

Hugo Ricardo Correia Rodrigues



# Estudo dos factores de distorção da velocidade medida na nacelle de um aerogerador

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a obtenção  
de grau de mestre em Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial  
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Julho de 2008



*... ao meu pai*





# Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Álvaro Rodrigues a orientação deste trabalho, bem como todas as condições que colocou ao meu dispor e que tornaram possível a sua realização. Fica sobretudo o agradecimento por todos ensinamentos que partilhou e que possibilitaram o meu crescimento tanto a nível profissional, como pessoal.

Pelas facilidades concedidas, agradeço ao INEGI, Instituto Nacional de Engenharia Mecânica, e, em especial, ao Nuno Cardoso, José Matos e ao Miguel Martins pela disponibilidade e aconselhamento na dissertação. A possibilidade de trabalhar num ambiente profissional directamente relacionado com os assuntos abordados nesta dissertação é motivo de um enorme e verdadeiro reconhecimento.

De igual modo, agradeço ao professor José Dias Rodrigues e ao meu amigo de infância João Luís Rebelo pelos conselhos e ensinamentos que possibilitaram a relatização desta tese em L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X.

Por último, gostava de agradecer à minha mãe por todo o seu esforço ao longo destes anos de curso para tornar possível a minha graduação.



## Resumo

A metodologia normalizada de medição das curvas de potência específica, para terrenos complexos, o erguer de uma segunda estação anemométrica a uma distância de dois a quatro diâmetros do rotor de forma a quantificar a velocidade não perturbada ao nível do rotor. Contudo, a complexidade orográfica pode inviabilizar a sua execução e o seu uso nem sempre é encorajador devido aos custos inerentes a todo o processo.

O objectivo desta tese é o estudo do uso do anemómetro na nacelle de um aerogerador como metodologia alternativa de medição da curva de potência de um aerogerador. Este incide na análise de três aerogeradores geometricamente idênticos, localizados em dois parques eólicos distintos: Candal/Coelheira e Outeiro.

A relação entre a velocidade medida pelo anemómetro e a velocidade não perturbada a montante do rotor foi estudada individualmente para cada aerogerador, permitindo quantificar os efeitos de distorção induzidos pelo rotor e determinar a curva de potência via anemómetro da nacelle, assim como a sua penalização em termos de produção anual expectável.

De igual modo foi analisada a variabilidade da relação entre velocidades para orografias, índices de turbulência e desalinhamentos entre o plano do rotor e o escoamento.

Por último, estudou-se a variação de velocidade do escoamento a montante e jusante do rotor na ausência de movimento deste.

As análises e conclusões deverão proporcionar um melhor entendimento das limitações da medição de curvas de potência via anemómetro na *nacelle*, assim como a adequabilidade da nova norma IEC-61400 parte 12-2.

## **Abstract**

The standard methodology for power performance assessment, specifies meteorological tower placement between two and four rotor diameters upwind of the test turbine. However, use of an upwind meteorological tower can be difficult at some sites. In some cases, complex terrain near the turbine may make placement of an upwind tower impossible. In addition, purchase and erection of a meteorological tower can be expensive, particularly as the hub height of large turbines increases.

The report describes measurements carried out in wind turbines that belong to two different wind farms: Candal/Coelheira and Outeiro. The correlation between mast and nacelle anemometer is investigated and the result of the power curve measurements is presented as a function of both mast and the "corrected" nacelle anemometer. The penalty of this alternative way in annual electric production forecasting is also addressed and quantified.

Period of data collected for each wind turbine, allowed to study and quantify the influence of orography, yaw error and turbulence in the correlation between mast and nacelle anemometer. In a similar way, downwind flow velocity was analysed in the absence of rotor motion.

Following the above analysis and conclusions, concerning the limits on the use of the nacelle anemometer as an alternative for power curve measurements, will be drawn as well the goodness of the new IEC standard.

# Conteúdo

<b>Nomenclatura</b>	<b>iv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Aspectos gerais . . . . .	3
1.2 Enquadramento da tese . . . . .	3
1.3 Objectivos . . . . .	6
1.4 Descrição geral da tese . . . . .	7
<b>2 As Fontes de Energia Renováveis</b>	<b>9</b>
2.1 Introdução . . . . .	11
2.2 A energia eólica . . . . .	12
<b>3 Fundamentos teóricos</b>	<b>15</b>
3.1 A aerodinâmica dos perfis alares . . . . .	17
3.2 Teoria de disco actuante . . . . .	19
3.3 Teoria das pás do rotor . . . . .	23
3.3.1 <i>Blade Element Theory</i> . . . . .	24
3.3.2 <i>Moment Element Theory</i> . . . . .	26
3.3.3 Factor de correcção de Glauert . . . . .	27
3.4 A estrutura da zona de esteira . . . . .	28
<b>4 Curvas de potência</b>	<b>31</b>
4.1 Design das pás dos aerogeradores . . . . .	33
4.1.1 Design dos aerogeradores . . . . .	33
4.1.2 Efeitos da discretização dos elementos de pá . . . . .	36
4.2 Curvas de potência . . . . .	38
4.3 Controlo de potência . . . . .	40

<b>5</b>	<b>Medição da curva de potência</b>	<b>45</b>
5.1	Equipamentos de medição . . . . .	47
5.2	Norma IEC61400- Parte 12-1 . . . . .	51
5.3	Norma IEC61400 - Parte 12-2 . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Descrição dos casos de estudo</b>	<b>59</b>
6.1	Parque eólico de Candal/Coelheira . . . . .	61
6.2	Parque eólico do Outeiro . . . . .	66
<b>7</b>	<b>Resultados</b>	<b>71</b>
7.1	Parque eólico de Candal/Coelheira . . . . .	73
7.1.1	Metologia e directrizes . . . . .	73
7.1.2	Relação entre velocidades . . . . .	76
7.1.3	Função transferência . . . . .	80
7.1.4	Curvas de potência . . . . .	81
7.1.5	Produção anual expectável . . . . .	85
7.1.6	Influência da orografia . . . . .	89
7.1.7	Influência da turbulência . . . . .	98
7.1.8	Influência do ângulo de ataque . . . . .	101
7.1.9	Influência do desalinhamento do rotor . . . . .	102
7.1.10	Rotor parado . . . . .	111
7.2	Parque eólico do Outeiro . . . . .	113
7.2.1	Metodologia e directrizes . . . . .	113
7.2.2	Relação entre velocidades . . . . .	115
7.2.3	Função transferência . . . . .	117
7.2.4	Curvas de potência . . . . .	118
7.2.5	Produção anual expectável . . . . .	122
7.2.6	Influência da orografia . . . . .	123
7.2.7	Influência da turbulência . . . . .	127
7.2.8	Rotor parado . . . . .	128
<b>8</b>	<b>Conclusão</b>	<b>129</b>

A	Curvas de potência mensais	133
B	Ajustamentos polinomiais	141
C	Índices de turbulência	145
D	Calibração da direcção do escoamento	149

# Lista de Figuras

1.1	Ilustração da metodologia de medição da curva de potência . . . . .	5
2.1	Crescimento da potência instalada cumulativa no mundo . . . . .	12
2.2	Distribuição cumulativa da potência instalada na europa . . . . .	13
3.1	Distinção entre a dinâmica do escoamento em perfis alares dos aerogeradores e num avião . . . . .	18
3.2	Descolamento da camada limite . . . . .	19
3.3	Disco actuador . . . . .	20
3.4	Definição de velocidades, ângulos e forças num elemento de pá . . . . .	24
3.5	Correcções empíricas para a <i>momentum theory</i> . . . . .	27
3.6	Modelo da circulação das pás a jusante do aerogerador . . . . .	29
4.1	Curvas de coeficiente de sustentação e de arrasto de uma perfil alar típico .	33
4.2	Distinção do comportamento aerodinâmico de pás torsionadas . . . . .	34
4.3	Representação gráfica da equação (4.13) . . . . .	37
4.4	Curva de performance típica de um aerogerador . . . . .	39
4.5	Comparação das curvas de desempenho . . . . .	39
4.6	Curvas de potência para distintas tipologias de controlo de potência . . . .	41
4.7	Coeficientes de sustentação e arrastos típicos de um perfil alar . . . . .	41
4.8	Comparação das curvas de potência para velocidades extremas . . . . .	42
5.1	Estação anemométrica . . . . .	48
5.2	Anemómetro de copos . . . . .	49
5.3	Catavento . . . . .	50
5.4	Metodologia para a medição da curva de potência - IEC61400 Parte 1 . . .	52



5.5	Espectro de energia do vento . . . . .	54
5.6	Metodologia para a medição da curva de potência - IEC61400 Parte 2 . . .	57
6.1	Topografia em torno ao aerogerador 8 . . . . .	61
6.2	Topografia em torno ao aerogerador 12 . . . . .	62
6.3	Inclinação do terreno de Candal/Coelheira . . . . .	63
6.4	Curvas de potência e dos coeficientes de potência dos aerogeradores de Candal/Coelheira . . . . .	66
6.5	Inclinação do terreno de Outeiro . . . . .	67
6.6	Curvas e coeficientes de potência dos aerogeradores do Outeiro . . . . .	69
7.1	Número de ocorrências por sector para os aerogeradores em estudo no par- que eólico de Candal/Coelheira . . . . .	76
7.2	Curvas de potência - Candal/Coelheira . . . . .	77
7.3	Relação entre velocidades - Candal/Coelheira . . . . .	78
7.4	Comportamento da velocidade do escoamento na zona de esteira para os aerogeradores de Candal/Coelheira . . . . .	79
7.5	Funções transferência . . . . .	81
7.6	Curvas de potência para o aerogerador 8 . . . . .	82
7.7	Curvas de potência para o aerogerador 12 . . . . .	83
7.8	Curvas de potência baseadas em ajustamentos polinomiais pelo dados bru- tos para ambos os aerogeradores . . . . .	84
7.9	Rosa e histograma de ventos - Port309 . . . . .	87
7.10	Rosa e histograma de ventos - Port312 . . . . .	87
7.11	Sensibilidade ao factor de escala e de forma - Candal . . . . .	88
7.12	Sensibilidade ao factor de escala e de forma - Coelheira . . . . .	88
7.13	Relação entre velocidades por sector - Candal/Coelheira . . . . .	90
7.14	Comportamento da velocidade do escoamento por sector . . . . .	91
7.15	Componentes verticais do escoamento no parque eólico de Candal/Coelheira	92
7.16	Curvas de potência sectoriais - Candal . . . . .	93
7.17	Curvas de potência sectoriais - Coelheira . . . . .	94
7.18	Sensibilidade ao factor de escala e de forma por sector - Candal . . . . .	96
7.19	Sensibilidade ao factor de escala e de forma por sector - Coelheira . . . . .	96

7.20	Curvas de potência baseada em funções transferência sectoriais . . . . .	97
7.21	Curvas de potência resultantes das ocorrências dos sectores contidos a Norte e a Sul . . . . .	98
7.22	Sensibilidade ao factor de escala e de forma da função transferência global	98
7.23	Intensidade de turbulência medida nas estações anemométricas PORT309 e PORT312 . . . . .	99
7.24	Curvas de rotação dos aerogeradores . . . . .	101
7.25	Sensibilidade à mudança de direcção do escoamento para os sectores calibrados	103
7.26	Desalinhamento entre o plano do rotor e o escoamento para ambos os aerogeradores . . . . .	105
7.27	Relação entre as velocidades para diferentes desalinhamentos - Aerogerador 8	106
7.28	Relação entre as velocidades para diferentes desalinhamentos - Aerogerador 12 . . . . .	107
7.29	Comportamento da velocidade do escoamento para diferentes desalinhamen- tos - Aerogerador 8 . . . . .	108
7.30	Comportamento da velocidade do escoamento para diferentes desfasamentos - Aerogerador 12 . . . . .	109
7.31	Relação de velocidades para o rotor parado . . . . .	111
7.32	Design característicos da pás do aerogerador . . . . .	113
7.33	Curvas de potência - Outeiro . . . . .	114
7.34	Número de ocorrências por sector para o aerogerador em estudo do parque eólico do Outeiro . . . . .	115
7.35	Relação entre velocidades para os diferentes períodos de estudo - Outeiro	116
7.36	Comportamento da velocidade do escoamento na zona de esteira para o aerogerador do Outeiro . . . . .	117
7.37	Funções transferência . . . . .	118
7.38	Curvas de potência para o período de Janeiro a Abril . . . . .	119
7.39	Curvas de potência para o período de Junho a Dezembro . . . . .	120
7.40	Curvas de potência baseadas em ajustamentos pelo dados brutos para am- bos os períodos de estudo . . . . .	121
7.41	Curvas de potência para funções de transferência diferentes . . . . .	122
7.42	Histograma de ventos - 281 . . . . .	122

7.43	Sensibilidade ao factor de escala e de forma das curvas de potência - Janeiro Abril . . . . .	123
7.44	Sensibilidade ao factor de escala e de forma das curvas de potência - Junho Dezembro . . . . .	124
7.45	Sensibilidade ao parâmetros da distribuição de Weibull para funções trans- ferências de Candal/Coelheira e do primeiro período de estudo . . . . .	124
7.46	Relação das velocidades sectorialmente para ambos os períodos de estudo .	125
7.47	Número de ocorrências nos sectores para ambos os períodos de estudo . . .	126
7.48	Intensidade de turbulência por sector . . . . .	128
7.49	Intensidade de turbulência medida na estação anemométricas PORT281 . .	128
A.1	Curvas de potência mensais do aerogerador 8 . . . . .	135
A.2	Curvas de potência mensais do aerogerador 12 . . . . .	137
A.3	Curvas de potência mensais do aerogerador 1 . . . . .	139
B.1	Ajustamento polinomiais para os sectores calibrados do aerogerador 8 . . .	143
B.2	Ajustamento polinomiais para os sectores calibrados do aerogerador 12 . .	144
C.1	Índices de turbulência para as estações anemométricas . . . . .	147
D.1	Regressões lineares para 2-8 m/s . . . . .	151
D.2	Regressões lineares para 8-16 m/s . . . . .	151
D.3	Regressões lineares para 2-8 m/s . . . . .	151
D.4	Regressões lineares para 8-16 m/s . . . . .	152

# Nomenclatura

$\alpha$	Ângulo de ataque do escoamento definido relativamente à corda do perfil
$\delta$	Desfasamento do azimute do escoamento com o plano do rotor
$\dot{m}$	Caudal mássico
$\Gamma$	Circulação
$\lambda$	Razão de velocidades
$\lambda_r$	Razão de velocidades local do elemento infinitesimal
$\omega$	Velocidade angular do rotor
$\phi$	Ângulo de ataque do escoamento definido relativamente ao plano do rotor
$\rho$	Massa volúmica
$\rho_0$	Massa volúmica de referência, $1.255 kg/m^3$
$\rho_{10m}$	Massa volúmica medida
$\sigma$	Desvio padrão da velocidade
$\sigma'$	Solidez local da pá do aerogerador
$\theta_p$	Ângulo de torsão relativamente ao plano do rotor
$\zeta$	Vorticidade
$A$	Factor de escala
$A$	Área do disco
$a$	Factor de indução axial

$a'$	Factor de indução angular
$B$	Número de pás do aerogerador
$c$	Comprimento da corda do perfil
$C_d$	Coeficiente de arrasto
$C_{d1}$	Coeficiente de arrasto para um factor de indução unitário
$C_l$	Coeficiente de sustentação
$C_p$	Coeficiente de performance
$dD$	Momento axial elementar
$dF_D$	Força de arrasto elementar definida no sistema de coordenadas ortogonal
$dF_D$	Força de arrasto elementar
$dF_L$	Força de sustentação elementar definida no sistema de coordenadas ortogonal
$dF_L$	Força de sustentação elementar
$dQ$	Momento angular elementar
$I$	Índice de turbulência
$K$	Factor de forma
$L$	Força de sustentação
$N$	Elemento infinitesimal da pá
$p_\infty$	Pressão estática do escoamento não perturbado
$r$	Distância do elemento infinitesimal ao eixo de revolução do rotor
$Re$	Número de Reynolds
$T$	Força de arrasto
$U$	Velocidade do escoamento
$u$	Velocidade medida na estação anemométrica de referência

$U_{rel}$	Velocidade relativa do escoamento
$V_i$	Velocidade média normalizada no bin $i$
$V_n$	Velocidade não perturbada ao nível do rotor normalizada
$V_{np}$	Velocidade não perturbada ao nível do rotor
$V_{an}$	Velocidade medida pelo anemómetro da nacelle
$V_{Ratio}$	Ratio entre a velocidade não perturbada ao nível do rotor e a do anemómetro da nacelle
$z_0$	Rugosidade do local
F	Factor de correcção de Prandtl

# Bibliografia

- [bib, 1999] (1999). *Recommended Practices for Wind Turbines Testing and Evaluation - 11. Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry*.
- [bib, 2005] (2005). *61400 Part 12-1: Wind turbines power performance testing*. IEC, first edition.
- [bib, 2006] (2006). *Global Wind Energy Outlook*. GWEC.
- [bib, 2008] (2008). *61 400 Part 12-2: Verification of power performance of individual wind turbines*. IEC. Draft version.
- [A. Albers et al., 2006] A. Albers, H. Klug, et al. (2006). Power performance. Technical report, Windenergie-Institut. Alemanha.
- [Akins, 1978] Akins, R. E. (1978). Performance evaluation of wind-energy conversion systems using the method of bins - current status. Technical report, Sandia Laboratory.
- [Albers et al., 2007] Albers, A., Jakobi, T., et al. (2007). Influence of meteorological variables on measured wind turbine power curves. Technical report, Deutsche WindGuard Consulting GmbH.
- [Ana Estanqueiro, 1997] Ana Estanqueiro (1997). *Modelação Dinâmica de Parques Eólicos*. PhD thesis, Instituto Superior Técnico.
- [António Sá da Costa, 2007] António Sá da Costa (2007). A energia eólica em Portugal.
- [Betz, 1920] Betz, A. (1920). *Das maximum der theoretisch möglichen ausnützung des windes durch windmotoren*, *Zeitschrift das gesamte Turbinewesen*, pages 307–309.
- [B.Smith et al., 2002] B.Smith, H.Link, et al. (2002). Applicability of nacelle anemometer measurements for use in turbine power. Technical report, National Renewable Energy Laboratory.

- [Cedric Alinot and Christian Masson, 2004] Cedric Alinot and Christian Masson (2004). *Aerodynamic of wind turbines in thermally stratified turbulent atmospheric boundary layer*. PhD thesis, Ecole de Technologie Supérieure, Montreal.
- [de Vries, 1979] de Vries (1979). Fluid dynamic aspects of wind energy conversion. Technical report, NATO Research Technology Association. Neuilly-sur-Seine, France.
- [Enercon, 2004] Enercon, editor (2004). *Considerably Higher Yields - Revolutionary Rotor Blade Design*. WindBlatt.
- [Enercon, 2006] Enercon (2006). Enercon Brochure: E-70 Wind power specification.
- [G. Botta and M. Cavaliere, 1998] G. Botta and M. Cavaliere (1998). Effects of hostile terrains on wind turbine performances and loads: The acqua spruzza experience. Technical report, ENEL.
- [Glauert, 1926a] Glauert, H. (1926a). *The elements of airfoil and airscrew theory*. Cambridge conference press.
- [Glauert, 1926b] Glauert, H. (1926b). *A general theory of the autogyro*. ARCR R & M.
- [GWEA, 2008] GWEA (2008).
- [H. Snel et al., 1993] H. Snel, R. Houwink, et al. (1993). Sectional prediction of 3d effects for seperated flow on rotating blades. Technical report, ECWEC.
- [Helmholtz, 1858] Helmholtz (1858). *Über Integrale der Hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen*.
- [Himmelskamp, 1992] Himmelskamp, H. (1992). *Profile investigations on a rotating airscrew*. PhD thesis, Gottingen University. Germany.
- [I.B. Troen and P. Erik, ] I.B. Troen and P. Erik. *European Wind Atlas*. Risø National Laboratory.
- [Iko Jervell, 2008] Iko Jervell (2008). Estudo das características do vento na performance dos aerogeradores.
- [J. Anthony and G. Niels, 1996] J. Anthony and G. Niels (1996). Exploring the limits of wasp. Technical report, Risø National Laboratory.



- [J. Johansen et al., 2002] J. Johansen, H.A. Madsen, et al. (2002). Numerical investigation of a wind turbine rotor with an aerodynamically redesigned hub-region. Technical report, Risø National Laboratory.
- [J. Matos et al., 2002] J. Matos, P. Fernandes, et al. (2002). Outeiro wind farm, wind power performance test - site calibration report. Technical report, INEGI. Outeiro Wind Farm.
- [J. Matos et al., 2006] J. Matos, P. Fernandes, et al. (2006). Candal/coelheira wind farm, wind power performance test - site calibration report. Technical report, INEGI. Candal/Coelheira Wind Farm.
- [John and Weir, 1986] John and Weir, T. (1986). Number 0 419 12010 6. TWIDELL.
- [K. H. Papadopoulos et al., 2001] K. H. Papadopoulos et al. (2001). Effects of turbulence and flow inclination on the performance of cup anemometers in the field, boundary-layer meteorology 101: 77-107. Technical report.
- [L Prandtl and O.G. Tietjens, ] L Prandtl and O.G. Tietjens. *Applied hydro and aeromechanics*. Dover, New York.
- [L.Kristensen, 1998] L.Kristensen (1998). Cup anemometer behavior in turbulent environments. Technical report, Oceanic Tech.
- [Musial, 2004] Musial, W. (2004). Wind turbine testing and certification. Technical report, NWTC.
- [Ower and E. Pankhurst, 1997] Ower and E. Pankhurst (1997). The measurement of air flow.
- [P.J. Moriarty, 2005] P.J. Moriarty (2005). Aerodyn theory manual. Technical report, NWTC.
- [R. Coquilla and J. Obermeier, 2004] R. Coquilla and J. Obermeier (2004). Calibration speed range for rotating anemometers used in wind energy applications. Technical report, Otech Engineering Inc.
- [R. Gash and J. Twele, 2002] R. Gash and J. Twele (2002). Wind power plants. Technical report, James & James Ltd.

- [R. Wilson and E. Lissaman, 1976] R. Wilson and E. Lissaman (1976). *Aerodynamic performance of wind turbines*. Energy research and development administration, ERDA/NSF/04014/1.
- [Raymond Hunter et al., 2001] Raymond Hunter, Troels Pedersen, et al. (2001). Measurement method to verify wind turbine performance characteristics. Technical report, Risø National Laboratory. Roskilde.
- [S. Frandsen et al., 1999] S. Frandsen et al. (1999). Power performance assessment. Technical report, Risø National Laboratory.
- [S. Sanada et al., 2004] S. Sanada, M. Fujino, et al. (2004). Numerical site calibration on a complex terrain and its application for wind turbine measures.
- [Stefan Ivanell, 2005] Stefan Ivanell (2005). Numerical computations of wind turbine wakes. Technical report, Royal Institute of Technology.
- [Tony Burton and David Sharpe, 2001] Tony Burton and David Sharpe (2001). *Wind Energy Handbook*. Number 0 471 48997 2. WILEY.
- [Troels Friis Pedersen, 2004] Troels Friis Pedersen (2004). Characterisation and classification of risø p2546 cup anemometer. Technical report, Risø National Laboratory. Roskilde.
- [U. Högström et al., 1988] U. Högström, D. N. Asimakopoulous, et al. (1988). A field study of the wake behind a 2 mw wind turbine. Technical report.

# Capítulo 1

## Introdução

*Aspectos gerais*

*Enquadramento da tese*

*Objectivos*

*Descrição geral da tese*



## 1.1 Aspectos gerais

A carência de combustíveis fósseis durante a Primeira e Segunda Guerra Mundial sensibilizou o mundo para a questão da forte dependência energética e da finitude das reservas mundiais, o que despertou a atenção para a necessidade da diversificação da geração de energia. As mudanças foram radicais nos últimos dois séculos e desde então têm vindo a multiplicar-se novas possibilidades para a manipulação técnica dessa aquisição da modernidade que é a energia, dando resposta a novas exigências políticas, sociais e ambientais.

Actualmente, as necessidades energéticas da Humanidade estão desigualmente distribuídas a partir de combustíveis fósseis, como carvão, o petróleo ou o gás natural, que são transformados por combustão noutras formas de energia, como a eléctrica. Assim, as energias renováveis (*FER*, Fontes de Energia Renováveis) integram-se num novo paradigma que procura dar resposta a uma dependência de recursos energéticos com onerosos custos económicos, ambientais e sociais. E, pelo seu carácter limpo, abundante, inesgotável e tecnicamente mais versátil do que outras fontes renováveis, a energia eólica é aquela que apresenta uma maior margem de progressão nos próximos anos.

A maturidade desta tecnologia confere aos seus projectos qualidade e aproveitamento que se traduz num cenário favorável ao investimento e no interesse económico de por parte de grandes instituições. Todavia, apesar da maturidade desta tecnologia, o estudo do potencial eólico, todo o processo de licenciamento e construção dos parques eólicos ainda é uma tarefa morosa e onerosa que envolve riscos financeiros.

Para ser possível aperfeiçoar todo o procedimento, é importante uma inovação na metodologia de construção de maneira a tornar menor o investimento, diminuir os seus riscos e a duração do seu retorno do investimento ser tanto quanto possível mitigada.

## 1.2 Enquadramento da tese

Com o aumento da importância da energia eólica como fonte de energia renovável e, conseqüentemente, a propagação do uso dos aerogeradores como meio para converter essa energia, todos os esforços se orientam para a pesquisa e melhoramento da *performance* destes. Para tal, torna-se necessário o conhecimento profundo do seu "combustível", o vento.

No âmbito desta investigação encontra-se a medição da curva de potência e desempenho de um aerogerador via anemómetro na *nacelle*. Esta, do ponto de vista técnico, é um

sumário das características técnicas deste mas quando observada na óptica do investidor, é o maior testemunho de fiabilidade e rentabilidade do parque eólico.

Previamente a serem comercializados, os aerogeradores são submetidos a testes de verificação, devidamente certificados, de todos elementos de segurança e controlo, estabilidade estrutural e resistência à fadiga baseados em códigos aeroelásticos que usam regimes de ventos estocásticos e recorrem a técnicas de análise em elementos finitos [Musial, 2004].

A análise de fenómenos aeroelásticos não-lineares através de dados experimentais é uma ferramenta para a identificação e controle de comportamentos aeroelásticos adversos. A modelagem matemática de sistemas aeroelásticos não-lineares não é trivial, facto que muitas vezes leva a adopção de simplificações, afastando o modelo da realidade. Desta forma, a análise de sistemas dinâmicos sem a necessidade de um modelo, feita através da análise de séries temporais obtidas de experimentos, pode fornecer melhores resultados e torna-se uma ferramenta útil no âmbito do estudo estrutural dos aerogeradores.

Relativamente ao desempenho aerodinâmico dos aerogeradores, o recurso a túneis de vento torna-se imperativo. Para tal, são utilizados modelos à escala sob condições em que o escoamento é homogéneo e perpendicular ao plano de revolução do rotor, o que não representa as condições reais a que o aerogerador está sujeito.

Exemplo disso é o comportamento de ajuste do rotor ao azimuth do vento através do registo de direcção proveniente do cata-vento e de um algoritmo específico de cada modelo. Um aumento da complexidade do terreno intensifica a distorção no escoamento e a influência de um perfil de velocidades que varia com a direcção, sazonalmente e de local para local, torna imperativo o conhecimento rigoroso da velocidade não perturbada à altura do rotor no local onde irá localizar-se aerogerador.

Deste facto, nasce a necessidade de criar uma solução para a verificação das curvas de potência no local, de forma a não subestimar a produção expectável de energia e garantir a qualidade do parque eólico às instituições financiadoras à construção deste. A figura 1.1 ilustra a metodologia usual para a medição da curva de potência.

Em terreno relativamente plano e com pouca vegetação, como é o exemplo de países como a Dinamarca e Alemanha, será espectável que a orografia do local não provoque uma distorção relevante no escoamento. Para medir a curva de potência do aerogerador, é necessário o levantamento de uma estação anemométrica, à mesma altura onde se localizará o rotor, no local, permitindo avaliar a velocidade não perturbada e determinar a curva de potência. A distância da estação anemométrica ao aerogerador tem de ser suficiente para que a velocidade seja realmente representativa da velocidade não perturbada no rotor.



velocidade medida pelo anemómetro localizado nesta é, ou não, uma solução plausível para a medição das curvas de potência. A sua simplicidade e versatilidade são características que a tornam muito apetecível, sendo necessário uma indagação profunda para a concepção de uma metodologia que a torne precisa e credível.

## 1.3 Objectivos

O objectivo desta tese de mestrado é o estudo da possibilidade do uso do anemómetro da nacelle como metodologia para determinar a curva de potência de um aerogerador. Esta permite diminuir os custos e tempo dispendidos na calibração do local e possibilita a avaliação da curva de potência em qualquer momento da via do aerogerador.

Este estudo é baseado nos dados de aerogeradores pertencentes a dois parques eólicos distintos, Candal/Coelheira e Outeiro. O conhecimento dos factores de calibração que permitem corrigir a distorção do escoamento devido à orografia e os dados do anemómetro na *nacelle* permite os seguintes objectivos:

1. Analisar a relação entre a velocidade do anemómetro na nacelle e a velocidade não perturbada ao nível do rotor obtida pelas factores de correcção, determinar qual o ajustamento matemático mais apropriado para o descrever e o seu impacto em termos de produção anual expectável
2. Investigar a influência da orografia e da turbulência na determinação da curva de potência e quantificar a penalização da transmissibilidade desse ajustamento matemático para locais com orografias distintas
3. Investigar a relação entre as velocidades para diferentes condições de desalinhamento entre a direcção do escoamento e o plano do rotor
4. Sob as condições de medição deficiente da velocidade do escoamento pelo anemómetro na nacelle, investigar a relação entre velocidades e quantificar a sua penalização em termos de produção anual expectável
5. Analisar a natureza do escoamento em torno da nacelle na ausência de movimento do rotor

Os objectivos deverão possibilitar um melhor juízo e compreensão sobre as virtudes da medição da curva de potência via anemómetro da nacelle.



## 1.4 Descrição geral da tese

Para além deste capítulo, a tese contém mais oito capítulos e quatro anexos.

No capítulo 2, "As fontes de energias renováveis", focam-se alguns aspectos sobre a situação do mercado mundial da energia eólica, e a maneira como esta pode e deve contribuir para um melhoramento da situação energética do mundo.

No capítulo 3, "Fundamentos teóricos", encontra-se descrito os fundamentos teóricos básicos que descrevem a interacção do escoamento com as pás dos aerogeradores, a sua extracção energética e a zona de esteira a jusante do aerogerador. Inicialmente encontram-se redigidas detalhadamente as abordagens teóricas do limite de Betz e da teoria dos elementos de pá, assim como os seus pressupostos. O capítulo finaliza com uma sucinta análise da complexidade da zona de esteira e da vorticidade a jusante das pás.

No capítulo 4, "Curvas de potência", caracteriza-se as diferentes arquitecturas de funcionamento dos aerogeradores. Apresentam-se os diferentes tipos de controlo de potência, a natureza inerente ao seu funcionamento e a sua influência na morfologia das curvas de potência.

No capítulo 5, "Medição da curva de potência", descreve-se a instrumentação associada à medição da curva de potência assim como a metodologia normalizada utilizada para a obtenção dos factores de correcção de velocidade do escoamento. De igual modo, é abordada a versão "Draft" da nova norma para a obtenção de curvas de potência via anemómetro da nacelle.

No capítulo 6, "Descrição dos casos de estudo", é caracterizado orograficamente os parques eólicos em estudo e apresentada detalhadamente toda a informação necessária para o posterior estudo de aferição da curva de potência via anemómetro na nacelle.

No capítulo 7, "Resultados", é completamente dedicado à análise dos factores que influenciam a velocidade medida pelo anemómetro na nacelle. Para além disso, em cada uma das etapas que a compõe, são apresentados e discutidos os cuidados na preparação e análise da informação que deve anteceder à aplicação propriamente dita.

No capítulo 8, "Conclusões", em que são expostas as conclusões decorrentes do presente trabalho e as sugestões para futuros estudos.

No anexo A, "Curvas de potência mensais", são expostas as curvas de potência baseadas na velocidade medida pelo anemómetro na nacelle para cada mês dos períodos de estudo.

No anexo B, "Funções transferência sectoriais", incluem-se os ajustamentos polinómiais que permitiram determinar as curvas de potência para cada sector individualmente.

No anexo C, "Índices de turbulência", encontram-se os índices de turbulência para cada sector nas estações anemométricas de referência e temporárias do parque eólico de Candal/Coelheira.

No anexo D, "Calibração da direcção do escoamento", incluem-se as regressões lineares resultantes da calibração da direcção do escoamento para cada um dos aerogeradores em estudo do parque eólico de Candal/Coelheira.

## Capítulo 2

# As Fontes de Energia Renováveis

*Introdução*

*A energia eólica*



## 2.1 Introdução

Nos dias correntes, as opções energéticas têm que satisfazer critérios políticos, económicos e ambientais e não é possível estabelecer metas de crescimento e desenvolvimento económico sem considerar o papel preponderante desempenhado pela energia.

As formas de energia tradicionais são cada vez mais ineficazes na resposta às solicitações. Se, por um lado, o aumento da população mundial faz com que o consumo energético também aumente, a diminuição das reservas de combustíveis fósseis provoca um aumento do custo da energia. Consequentemente, nas regiões mais pobres, e apesar do consumo energético ser ainda extremamente baixo, a dependência externa é cada vez maior e o acesso à energia é cada vez mais difícil, pois o crescimento económico está inevitavelmente ligado ao crescimento do consumo de energia "per capita".

A dependência dos fornecimentos de energia em que os países que não possuem reservas de combustíveis fósseis acabam por cair, tem por sua vez um preço que, embora de forma indirecta, onera os custos da utilização de fontes de energia convencionais. São bem conhecidas as consequências das recentes crises petrolíferas nas economias dos países não produtores. Do ponto de vista ambiental, estão hoje patentes os problemas causados pela forma como a energia tem sido utilizada, e em alguns países como Suíça e Dinamarca o seu custo é agravado por um imposto que traduz os efeitos nocivos provocados no ambiente.

As energias renováveis têm a vantagem de existir tanto nas regiões mais remotas e menos privilegiadas, como nos países mais desenvolvidos. Como são renováveis, não há o risco da sua diminuição, tendo ainda a vantagem de não agravar os níveis da poluição ambiental. Provêm de um fluxo energético natural que já existe no ambiente, logo não provocam poluição térmica, a não ser em muito pequena escala. Da mesma forma, a poluição química do ar e da água tende a ser mínima.

No caso de grandes instalações poderá falar-se em impacto visual não desejável. Mesmo sendo uma questão subjectiva, a correcta localização das instalações e o estudo do seu enquadramento poderão reduzir a níveis de consenso a interferência paisagística dos empreendimentos.

As energias renováveis provêm das seguintes fontes [John and Weir, 1986]:

- O Sol
- O movimento e o potencial gravítico do Sol, da Lua e da Terra;
- A energia geotérmica devida ao arrefecimento, às reacções químicas e ao decaimento do nível da radioactividade na Terra.

O grande desafio da utilização das energias renováveis passa pela sua incorporação no estilo de vida moderna, através de um planeamento adequado e da utilização de tecnologias que as possam tornar competitivas face às fontes tradicionais. Aqui, assume particular destaque a produção de electricidade, forma de energia muito nobre e, por isso, objecto dos maiores esforços no que respeita no que respeita à optimização dos processos conducentes à sua utilização.

## 2.2 A energia eólica

Os ventos resultam do facto das regiões equatoriais receberem mais energia solar que as regiões polares, o que gera correntes de convecção na atmosfera. Os meteorologistas estimam que 1% da radiação solar recebida pela Terra em apenas dez dias é igual ao conteúdo energético das reservas mundiais de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), sendo facilmente perceptível a dimensão potencial deste recurso.

A indústria eólica é, presentemente, a que maior crescimento tem experimentado a nível mundial, só sendo mesmo ultrapassada pelo mercado dos telemóveis [GWEA, 2008]. Através do aproveitamento energético deste recurso natural a Europa suprime 3.7% da sua necessidade de electricidade e determinou como objectivo para 2020 aumentar essa quota-parte para 21%.

As figuras 2.2 e 2.2 evidenciam a evolução da potência instalada de energia eólica no mundo e a presentemente registada por toda a europa.

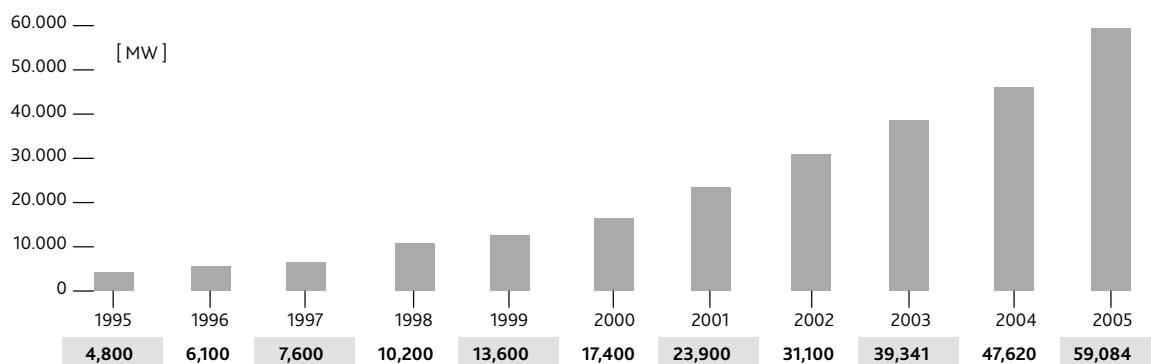


Figura 2.1: Crescimento da potência instalada cumulativa no mundo, [bib, 2006]



Figura 2.2: Distribuição cumulativa da potência instalada na europa, [GWEA, 2008]

No entanto, todas as tecnologias de aproveitamento energético apresentam impacto ambiental e a tecnologia eólica não é excepção. Normalmente coloca-se a questão do ruído produzido pelos aerogeradores e da ameaça ambiental relativamente à avifauna. Relativamente ao ruído, existem duas potenciais fontes:

1. O atravessar do escoamento pelos perfis alares dos aerogeradores
2. A caixa de velocidades e o gerador no interior da nacelle

Este problema pode ser facilmente resolvido com um maior atenção por parte dos fabricantes na forma dos perfis alares e um bom isolamento da nacelle. A existência de legislação que estabelece uma distância mínima às populações vizinhas e o seu cumprimento, é condição suficiente para contornar estas adversidades.

Quanto ao ambiente as opiniões, geralmente advêm ou de grupos de defesa dos animais. A opinião não é consensual e estudos de monitorização de mortes de aves em parques eólicos demonstram, que o número de acidentes rodoviários em estradas portuguesas são superiores aos índices de mortalidade das aves nas pás dos aerogeradores, [António Sá da Costa, 2007].

O optimismo relativamente à energia eólica e a sua capacidade para suprimir a demanda eléctrica ainda provoca reacções de cepticismo devido ao carácter intermitente do

vento. A situação agrava-se pelo facto de o vento não se encontrar sempre disponível e os aerogeradores só a partir de velocidades aproximadamente superiores a 15 m/s é que se encontram em plena carga implicando um factor de carga dependente do local onde se encontra implementado o parque eólico.

No entanto, nenhuma tecnologia de aproveitamento energético está sempre disponível para produzir electricidade; daí, a intermitência do vento não ser argumento suficiente. De igual modo, para solucionar o problema da produção eléctrica, será sempre necessário manter as centrais eléctricas convencionais operacionais de maneira a ser possível responder a uma súbita demanda eléctrica.

Apesar de tudo os sectores políticos de todos os países do mundo consciencializaram-se do problema energético e torna-se necessário o investimento nesta tecnologia para um crescimento económico sustentado. Um bom exemplo do referido é a América do Norte e Ásia que apresentam um investimento crescente em energia eólica, porém, ainda inferior ao realizado na Europa nos últimos 10 anos.

Este acréscimo é de tal relevância que especula-se que a China poderá ultrapassar a Europa em termos de maior potência instalada mundial até 2012[GWEA, 2008]. Os motivos para esta tendência devem-se, em primeiro lugar, ao facto que tanto os Estados Unidos como a China têm vindo a aumentar e permanecerão a crescer economicamente a um ritmo muito mais rápido do que o esperado, relativamente a anos anteriores.

Em segundo lugar, o aparecimento significativo da capacidade de fabrico da China terá um impacto mais importante sobre o crescimento dos mercados globais. O aumento da capacidade de produção será limitado se não se recorrer a alternativas energéticas para um desenvolvimento sustentável, tornando-se assim necessário o aproveitamento energético de todos os recursos endógenos disponíveis.

Todo este enquadramento global demonstra que a energia eólica trouxe parte da solução para o problema energético do mundo e a par da energia mini-hídrica é, sem margem para dúvidas, a forma de energia renovável que mais próxima se encontra da "competitividade" na produção de electricidade.



# Capítulo 3

## Fundamentos teóricos

*A aerodinâmica dos perfis alares*

*Teoria do disco actuador*

*Teoria dos elementos de pás*



# Introdução

Um aerogerador, de uma forma simples, é um dispositivo que permite extrair a energia cinética contida no vento. A maneira como a energia cinética é aproveitada para a produção eléctrica depende, numa primeira fase, da aerodinâmica do aerogerador. A maioria dos aerogeradores inclui um rotor, com um determinado número de pás, a rodar a uma determinada velocidade angular, preferencialmente, paralelo à direcção do vento.

As pás, em virtude da sua aerodinâmica, desenvolvem em torno de si um gradiente de pressões assimétrico permitindo a criação de forças de sustentação que, por sua vez, provocam um momento no sentido do rotor e são responsáveis pela diminuição da quantidade de movimento axial na zona de esteira.

Associado à diminuição da quantidade de movimento, há uma perda de energia por parte do escoamento que, através do acoplamento do rotor a um gerador eléctrico pode ser convertida em energia eléctrica. Vários esforços têm sido realizados no âmbito de modelar matematicamente o escoamento em torno de um aerogerador e, em virtude disso, algumas teorias surgiram com bastante aceitação na comunidade científica.

## 3.1 A aerodinâmica dos perfis alares

A geometria das pás de um aerogerador baseia-se em perfis alares semelhantes aos utilizados na indústria aeronáutica. Dentro dos vários modelos desenvolvidos destacam-se os perfis *NACA* que, devido a sua desempenho aerodinâmica, são geralmente adoptados nas pás dos aerogeradores. Logo, para ser possível o aproveitamento da energia do vento é necessário definir e conhecer a natureza e as características físicas do primeiro elemento interveniente em todo esse processo.

Em virtude da sua aerodinâmica, quando um escoamento incide num perfil alar este, desenvolve em torno de si forças de sustentação e de arrasto devido a um gradiente de pressões e à fricção do escoamento. Para ser possível conhecer o módulo dessas forças, é necessário a integração do perfil dessas pressões e tensões em torno do perfil a partir das equações que descrevem o escoamento.

No entanto, a modelação matemática em torno do perfil alar não é de carácter simples e, ortodoxamente, recorre-se a teste aerodinâmicos em túneis de vento para a determinação dessas forças. Por norma, os resultados dessas medições vêm sob a forma de coeficientes adimensionais de arrasto ou de sustentação, em que  $L$  e  $D$  representam as forças de sustentação e arrasto, respectivamente.

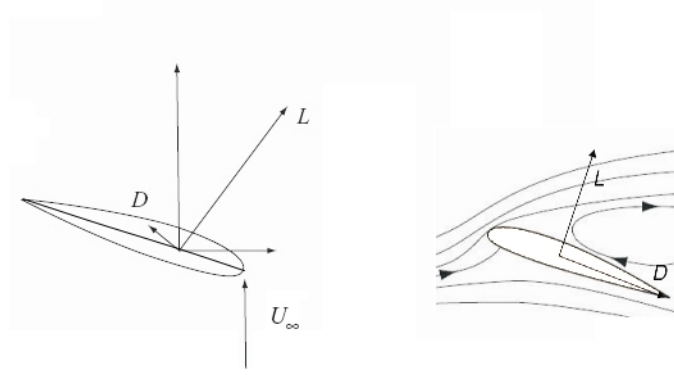


Figura 3.1: Distinção entre a dinâmica do escoamento em perfis alares dos aerogeradores e num avião

$$C_d = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho A_p U^2} \quad (3.1)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho A_p U^2} \quad (3.2)$$

Estas forças dependem da sua geometria e do ângulo de ataque do escoamento em que este último depende da cinemática do perfil. Para perfis alares estáticos, o ângulo de ataque é definido pelo ângulo que o escoamento faz com a linha imaginária que une o bordo de ataque ao bordo de fuga. Na presença de rotação do rotor, o ângulo de ataque é definido pelo ângulo entre a velocidade relativa, resultante da componente axial de velocidade do perfil alar com a do escoamento, e a corda do perfil.

Um aumento do número de Reynolds ou variação o ângulo de ataque do escoamento, a camada limite desenvolvida em torno deste tende a descolar antes de percorrer toda a sua superfície. A figura 4.7 permite retratar a natureza do descolamento da camada limite.

Primeiramente, o ar escoa a uma determinada velocidade não perturbada e, ao atingir o perfil, cria na sua frente um ponto em que o escoamento atinge uma velocidade nula designado por *ponto de estagnação*.

Em virtude da morfologia do perfil, o escoamento possui uma maior aceleração no bordo superior, originando um gradiente de pressões assimétrico que resulta no aparecimento de forças de sustentação. Devido à fricção deste com a superfície, verifica-se uma diminuição da sua energia e, conseqüentemente, um desaceleramento à medida que percorre a superfície do perfil, até ao momento em que parte da camada limite, junto ao perfil, reverte o seu sentido e deixa de ser possível vencer o gradiente de pressão adverso entre o bordo de ataque e o de fuga.

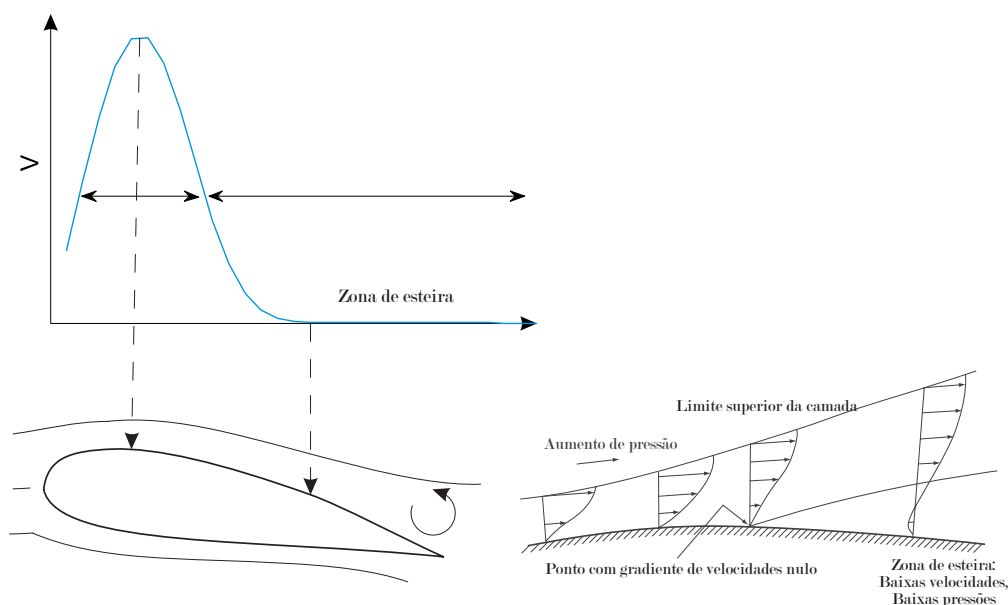


Figura 3.2: Descolamento da camada limite, [Tony Burton and David Sharpe, 2001]

O resultado é a sua separação da superfície, normalmente designada por descolamento da camada limite ou *stall*. A partir desse momento, ocorre a formação de vórtices a jusante que origina uma complexa zona de esteira. No entanto, este efeito é indesejado e através da variação do ângulo de ataque consegue-se controlar o fenómeno de descolamento da camada limite e, em virtude disso, a intensidade das forças de sustentação e arrasto.

Todos estes fenómenos do escoamento se reflectem no balanço de forças a que se encontra sujeito o perfil alar, e o conhecimento do princípio físico destes coeficientes e da sua variação com o ângulo de ataque de um determinado perfil, é a base para o controlo de potência dos aerogeradores que será abordada mais à frente.

A existência de um perfil de velocidades no escoamento, do movimento de rotação do rotor e a este não se encontrar alinhado com o escoamento numa grande maioria das circunstâncias, resulta numa variação das condições ao longo do raio do rotor. Daí, ser imperativo conhecer a verdadeira essência do escoamento de maneira a se atingir o máximo de eficiência possível no aproveitamento da energia contida no vento e compreender toda a sua zona de esteira onde se encontra o anemómetro da nacelle.

## 3.2 Teoria de disco actuante

Para se proceder à análise e quantificação do aproveitamento energético possível do escoamento, existem variadas teorias dos quais se destacam a de Betz [Betz, 1920]. Realizada

por Rankine (1895) mas geralmente atribuída a Betz (1926), é baseada no princípio da conservação da quantidade de movimento.

Parte do pressuposto que o rotor possui um número infinito de pás, isto é, o seu comportamento relativamente ao escoamento assemelha-se a um disco; e o escoamento a que este está sujeito é todo ele puramente axial, permanente e os efeitos rotacionais e fricção impostos pela sua passagem no disco são negligenciáveis.

Tendo presentes as condições impostas, o escoamento pode ser separado em duas áreas: numa em que a passagem do escoamento directamente no disco resulta na extracção de parte da sua energia cinética e, por sua vez, numa diminuição de velocidade e numa outra que o contorna não influenciando a sua velocidade.

Assim sendo, é possível delinear uma fronteira entre os dois escoamentos a montante e jusante do disco formando assim um tubo de secção circular.

Como a troca de massa entre a fronteira e a compressibilidade dos escoamentos é nula, a conservação de massa ao longo de todos os pontos do tubo mantém-se válida e a diminuição de velocidade, intrínseca ao princípio de conservação de massa, resulta numa expansão de área de secção após a passagem no disco.

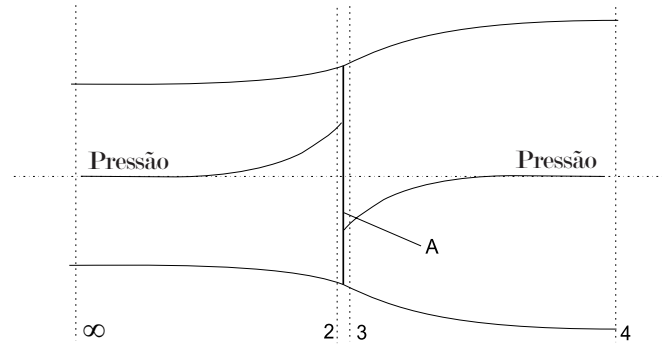


Figura 3.3: Disco actuador

Pelo princípio de conservação de massa num volume de controlo ao sistema resulta que:

$$(\rho AU)_{\infty} = (\rho AU)_4 = \dot{m} \quad (3.3)$$

Onde  $\dot{m}$  é o caudal mássico que escoar através do disco. O impulso axial é assim determinado pela multiplicação do caudal mássico pela diferença de velocidades:

$$T = \dot{m} (U_{\infty} - U_4) \quad (3.4)$$

Da aplicação do princípio da conservação do caudal mássico e da quantidade de movimento linear, é possível determinar o arrasto e potência caso as condições previamente enunciadas sejam respeitadas. Do princípio de conservação da quantidade de movimento temos que:

$$T = U_{\infty}(\rho AU)_{\infty} - U_4(\rho AU)_4 \quad (3.5)$$

Onde  $\rho$  representa a massa volúmica do ar,  $A$  a área do disco,  $U_{\infty}$  a velocidade não perturbada e  $U_2, U_3, U_4$  as velocidades nas posições indicadas na figura 3.8.

A queda de pressão causada pela presença do disco permite, de igual modo, deduzir a expressão do arrasto no disco. Considere-se a aplicação da equação de Bernoulli ao longo de duas linhas de corrente a montante e a jusante do disco actuador. A montante do disco temos que:

$$p_{\infty} + \frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2 = p_2 + \frac{1}{2}\rho U_2^2 \quad (3.6)$$

A jusante:

$$p_3 + \frac{1}{2}\rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2}\rho U_4^2 \quad (3.7)$$

Assumindo que a pressão estática a montante e jusante do disco actuador é igual a pressão estática ambiente ( $p_{\infty} = p_4$ ) e a velocidade no momento em que o escoamento atravessa o disco mantêm-se constante ( $U_2 = U_3$ ), o arrasto pode ser exprimido por:

$$T = A(p_2 - p_3) \quad (3.8)$$

Através de uma alguma manipulação matemática as equações (3.6) e (3.7) podem ser integradas em (3.8) dando origem a:

$$T = \frac{1}{2}\rho A_2(U_{\infty}^2 - U_4^2) \quad (3.9)$$

Por fim, combinando as expressões (3.3) e (3.9):

$$\dot{m}(U_{\infty} - U_4) = \frac{1}{2}\rho A_2(U_{\infty}^2 - U_4^2) \quad (3.10)$$

Do balanço mássico do escoamento através do disco resulta que  $\dot{m} = \rho A_2 U_2$  ou  $\dot{m} = \rho A_3 U_3$ . Substituindo na expressão (3.10) dá origem ao que se designa por *Teorema de Froude's*.

$$U_2 = \frac{U_\infty + U_4}{2} \quad (3.11)$$

Introduzindo o factor de indução ou retardamento axial, que traduz a influência do disco no escoamento:

$$a = \frac{U_\infty - U_1}{U_\infty} \quad (3.12)$$

Daqui:

$$U_2 = U_\infty(1 - a) \quad (3.13)$$

$$U_4 = U_\infty(1 - 2a) \quad (3.14)$$

No entanto, esta teoria apenas se mantém válida para valores de  $a$  compreendidos entre 0 e 0.5. Todos os pressupostos levam a um desvio da realidade e, em virtude disso, esta teoria na prática deixa de ser válida para valores de factores de indução superiores a 0.35.

Assumindo que todo o processo de passagem do disco se dá isotérmicamente e que a pressão após a zona de esteira é igual à pressão ambiente, um balanço energético do escoamento através da aplicação da primeira lei da termodinâmica permite concluir que a potência é igual à força de arrasto multiplicada pela velocidade a montante do disco:

$$P = \frac{1}{2}\rho A_2 (U_\infty^2 - U_4^2) U_2 = \frac{1}{2}\rho A_2 (U_\infty - U_4) (U_\infty + U_4) U_2 \quad (3.15)$$

Substituindo a equação (3.13) e (3.12):

$$P = \frac{1}{2}\rho A_2 U_\infty^3 4a(1 - a)^2 \quad (3.16)$$

O facto de a velocidade do escoamento não perturbado se encontrar elevada a terceira potência na equação (3.16) evidencia a importância desta para uma majoração da potência mecânica resultante. O avaliação do rendimento de todo o processo de aproveitamento e perdas de energia é exprimido por um coeficiente de potência  $C_p$ , que é dado pelo quociente entre a potência no rotor e a energia contida no vento:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A U_\infty^3} \quad (3.17)$$

Da substituição da potência mecânica na equação (3.17) e através cálculo da primeira derivada  $\frac{dC_p}{da} = 0$ , determina-se qual o máximo de rendimento que é possível obter assim



qual o factor de indução axial respectivo.

$$C_{p_{max}} = \frac{16}{27} \quad (3.18)$$

O máximo de  $C_p$  ocorre quando  $a = \frac{1}{3}$  dando lugar ao que vulgarmente se apelida de *limite de Betz*. Este permite saber qual o limite da energia máximo que se consegue extrair do escoamento.

Em aerogeradores comerciais para produção eléctrica, consegue-se atingir  $C_p$  na ordem dos 0.4 a 0.5, porém, em aerogeradores de carácter experimental consegue-se alguns melhoramentos significativos atingindo-se valores superiores a 0.5. No entanto, em caso algum se conseguiu exceder este limite [Tony Burton and David Sharpe, 2001].

### 3.3 Teoria das pás do rotor

#### Introdução

O pressuposto da presença de um disco no lugar do rotor omite a verdadeira natureza da interacção do escoamento com os perfis alares.

Na realidade, da interacção do escoamento com as pás do aerogerador resulta, pela 3ª Lei de Newton, um momento de reacção com direcção oposta e intensidade igual ao imposto pelo escoamento. Em virtude dessa reacção, o escoamento ao longo da espessura do rotor adquire momento angular e, conseqüentemente, resulta no aparecimento de duas componentes de velocidade, uma tangencial à rotação e outra axial.

A modelação do comportamento do escoamento na presença do rotor, encontra-se presentemente descrita pela *blade element momentum theory* e foi concebida por Glauert [Glauert, 1926a]. Os seus fundamentos provêm de duas maneiras distintas de análise da energia extraída pelas pás do rotor:

1. *Blade element theory*, em que se assume que o rotor encontra-se perpendicular ao escoamento, as pás podem ser divididas em elementos infinitesimais e não existe interacção com o escoamento dos elementos vizinhos. O seu comportamento pode ser descrito bidimensionalmente através das condições do escoamento não perturbado e das características aerodinâmicas dos perfis em cada elemento.
2. *Momentum theory*, pressupõe que a existência das forças aerodinâmicas nos perfis se deve à diminuição de quantidade de movimento do escoamento nas pás do aerogerador. Da divisão em elementos finitos ao longo das pás e do movimento de rotação do

rotor, esses elementos delineam zonas anulares através das quais ocorre a mudança de direcção da velocidade que podem ser determinadas por variações de quantidade de movimento.

Os pressupostos da inexistência de assimetria do escoamento e de que a circulação do escoamento ao longo da pá é uniforme, isto é,  $a$  é constante, tornam questionável a sua precisão. Cada elemento é interpretado bidimensionalmente e assume-se a nulidade dos efeitos dos elementos vizinhos no elemento infinitesimal  $N$ .

A agravante dos pressupostos da aplicação da equação da quantidade de movimento torna estas condições desvirtualizadoras quando, por exemplo, ocorrem deflexões significativas nas pás do aerogerador.

### 3.3.1 Blade Element Theory

Para uma melhor compreensão do balanço de forças no perfil das pás do aerogerador, estão assinalados na figura 3.3.1 três sistemas de eixos com cores distintas para um elemento  $N$  da pá de um aerogerador.

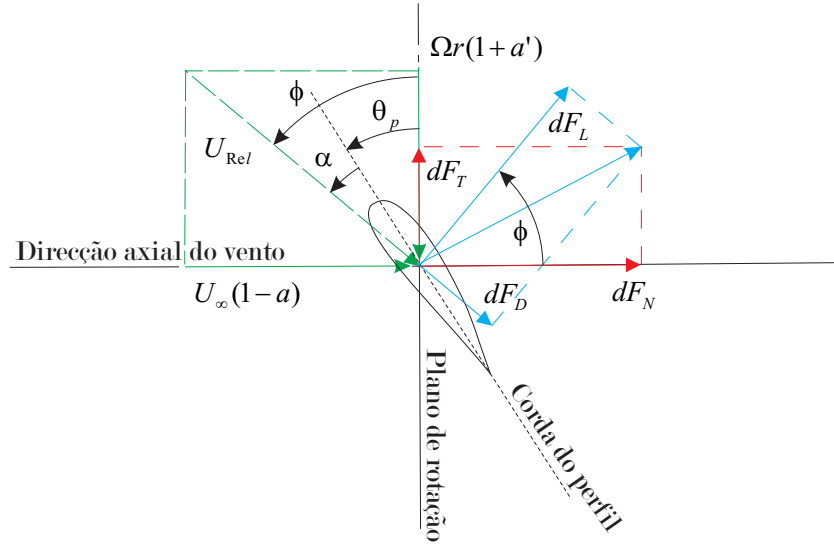


Figura 3.4: Definição de velocidades, ângulos e forças num elemento de pá

- A verde encontram-se representadas, vectorialmente, todas as velocidades.  $U_{rel}$  é a velocidade relativa resultante da velocidade tangencial do rotor com a velocidade do escoamento em que  $U_\infty(1-a)$  representa a indução axial. A contribuição angular é a combinação da velocidade angular  $r\omega$  com o factor de indução angular  $a'$

que quantifica a mudança da velocidade do escoamento na componente tangencial resultante da sua interacção com as pás.

- O sistema a azul são as forças ortogonalmente e paralelamente dispostas relativamente à velocidade do escoamento.
- A vermelho são as mesmas forças do referencial azul mas transformadas para o plano de rotação.

O incremento da força  $dF_L$  representa a contribuição desta na direcção angular do elemento  $N$ , ou seja, o momento útil.  $dF_N$  não irá, neste caso, contribuir para um aumento do momento, mas sim para um aumento das impulso axial. O ângulo do elemento, relativamente ao plano do rotor, encontra-se representado por  $\theta_p$  e resulta do somatório do ângulo da raiz da pá com o ângulo de torção local do elemento  $N$ . O ângulo de ataque do elemento infinitesimal e o azimuth do escoamento relativamente ao plano do rotor, encontram-se representados respectivamente por  $\alpha$  e  $\phi$ . A análise da figura 3.3.1 permite determinar as seguintes relações:

$$\tan \phi = \frac{U_\infty (1 - a)}{\Omega r (1 + a')} = \frac{1 - a}{(1 + a') \lambda_r} \quad (3.19)$$

$$U_{rel} = \frac{U_\infty (1 - a)}{\sin \phi} \quad (3.20)$$

$$dF_L = C_l \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (3.21)$$

$$dF_D = C_d \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c dr \quad (3.22)$$

$$dF_N = dF_L \cos \phi + dF_D \sin \phi \quad (3.23)$$

$$dF_T = dF_L \sin \phi - dF_D \cos \phi \quad (3.24)$$

O força resultante será o somatório das contribuições de todas as secções multiplicadas pelo número de pás,  $B$ . Para um elemento na posição radial  $r$  a força normal, isto é, a força responsável pelo arrasto será dada por:

$$dT = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) c dr \quad (3.25)$$

O momento,  $Q$ , para uma secção da posição radial  $r$  é assim definido por:

$$dQ = B r dF_T = B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) c r dr \quad (3.26)$$

As expressões (3.25) e (3.26) demonstram as expressões gerais para o momento e arrasto nas pás de um aerogerador, no entanto, esta teoria possui algumas fragilidades.

A presunção que o escoamento em torno do perfil alar encontra-se sempre em equilíbrio e que ocorre um aceleração instantâneo para ajustar as mudanças de vorticidade na zona de esteira na prática não se verifica. A variação das condições do escoamento não perturbado ou do ângulo de ataque dos perfis resultam numa adaptação do escoamento às novas condições da zona de esteira, o que implica um tempo de resposta considerável, [P.J. Moriarty, 2005].

### 3.3.2 *Moment Element Theory*

Um balanço de momentos axiais e angulares da secção  $N$  representada na figura 4.8, permite concluir que:

$$dD = 4a(1-a)\rho U_\infty^2 \pi r dr \quad (3.27)$$

$$dQ = 4a'(1-a)\rho U_\infty \Omega \phi r^3 dr \quad (3.28)$$

Da manipulação matemática das equações (3.27) e (3.28) com (3.25) e (3.26), previamente obtidas na óptica da *Blade Element Theory*, resulta:

$$dD = \sigma' \phi \rho \frac{U_\infty^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_l \cos \phi + C_d \sin \phi) r dr \quad (3.29)$$

$$dQ = \sigma' \phi \rho \frac{U_\infty^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_l \sin \phi - C_d \cos \phi) r^2 dr \quad (3.30)$$

onde  $\sigma'$  é a solidez local da pá ou *chord solidity* e é definida por:

$$\sigma' = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (3.31)$$

Para ser possível resolver as equações (3.29) e (3.30) é necessário aferir os factores de indução axial e angular segundo um processo iterativo de cálculo. Porém, o déficit de velocidade na passagem do escoamento na pás do rotor devido ao arrasto é diminuto e Wilson e Lissaman [R. Wilson and E. Lissaman, 1976] demonstraram, que a exclusão do coeficiente de arrasto dessas expressões leva a pequenos erros.

Excluindo  $C_d$  das expressões (3.29) e (3.30), o momento da secção  $N$  é dado por:

$$dQ = 4a'(1-a)\rho U_\infty \omega r^3 dr \quad (3.32)$$

$$dQ = \sigma' \phi \rho \frac{U_\infty^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} C_l \sin \phi r^2 dr \quad (3.33)$$

### 3.3.3 Factor de correcção de Glauert

Quando os aerogeradores funcionam com elevadas razões de velocidades nas pás, como por exemplo velocidades angulares constantes e baixas velocidades do vento, o rotor entra num estado designado de estado de esteira turbulenta ( $a > 0,5$  e  $a' > 0,5$ ).

De acordo com a *momentum element theory*, este estado resulta numa estagnação do escoamento e, posteriormente, na inversão do seu sentido, o que é uma situação fisicamente impossível. Na realidade, o que se verifica é um aumento de turbulência na zona de esteira e uma maior mistura com o escoamento circundante. Em virtude disso, o escoamento na zona de esteira diminui de velocidade mas o impulso axial existente no rotor tende a aumentar.

Do conhecimento e da indagação deste fenómeno, Glauert propôs a aplicação da correcção da *momentum theory* baseados em medições experimentais, [Glauert, 1926b].

Pressupondo  $C_{D1}$  o valor do coeficiente de arrasto para  $a = 1$  a correcção empírica experimental deverá ser tangencial à prevista pela BEM no ponto de transição.

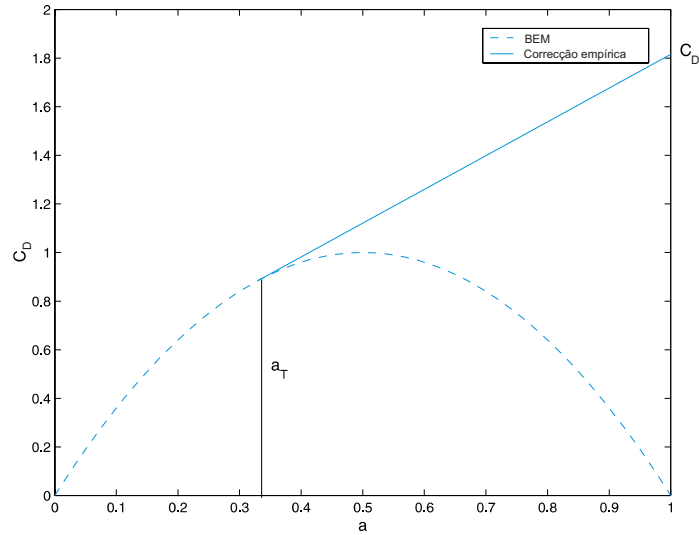


Figura 3.5: Correcções empíricas para a *momentum theory*

A expressão que descreve a correcção empírica é dada por:

$$C_D = C_{D1} - 4 \left( \sqrt{C_{D1}} - 1 \right) (1 - a) \quad (3.34)$$

em que o valor de  $a_T$  no ponto de transição é definido por:

$$a_T = 1 - 0.5\sqrt{C_{D1}} \quad (3.35)$$

### 3.4 A estrutura da zona de esteira

O escoamento a jusante do rotor de um aerogerador é de elevada complexidade e é necessário caracterizá-lo para um conhecimento apropriado da zona de esteira. No entanto, ainda residem algumas questões relativamente à sua natureza e para ser possível a sua modelação, o recurso a programas de simulação CFD baseados nas equações de Navier-Stokes revelam-se potencialmente promissores quanto à solução deste problema.

Os primeiros postulados para descrever o movimento de partículas elementares fluidas invíscidas sujeitas a um comportamento de vorticidade foram postulados por Helmholtz, sendo posteriormente reformuladas a escoamentos víscidos por Kelvin [Helmholtz, 1858].

Os postulados são baseados em métodos de discretização do campo de vorticidade e da descrição Lagrangiana das equações que governam o seu movimento, ou seja, o fluido pode ser interpretado como um colectivo de fluidos elementares que se movem, deformam e rodam livremente e o recurso a métodos computacionais é imperativo para a sua resolução.

Teoricamente, a circulação na fronteira de um perfil é igual à circulação no bordo de fuga, ou seja, na zona de esteira. Para escoamentos invíscidos, a soma dos vórtices criados desde a base até à extremidade da pá deve ser nula, no entanto, este não é o caso de escoamentos víscidos.

Na realidade, desde a base à sua extremidade, os vórtices têm diferentes sentidos de circulação e uma ligeira variação da circulação originará a uma concentração de vórtices na extremidade da pá. O sinal do gradiente da circulação em todo o comprimento da pá irá determinar o sentido de rotação dos vórtices a jusante da pá, o que significa que se existir mais do que uma zona com gradientes negativos a concentração de vórtices avocada para esta.

A figura 3.6 demonstra duas diferentes distribuições de circulação num aerogerador. À esquerda, a distribuição apenas possui um gradiente de circulação positivo e negativo, logo, existe apenas uma área de vórtices com sentidos positivos e negativos. À direita, encontra-se a distribuição da circulação com duas áreas com gradientes positivos e negativos. Essa originará quatro vórtices em vez de dois.

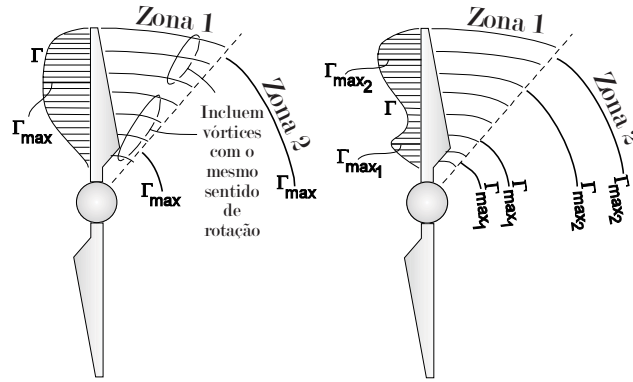


Figura 3.6: Modelo da circulação das pás a jusante do aerogerador

Caso se trata-se de um escoamento invíscido a circulação terá de ser uniforme e máxima da base da pá até à sua extremidade mas, tal não sucede devido à concentração de vórtices na extremidade da pá e a circulação na zona de esteira deverá corresponder a esse valor.

Na realidade, a formação de vórtices é afectada de modo desigual devido à viscosidade e não é possível concluir sobre a dependência da formação de vórtices na raiz e extremidade da pá.

Esta facto demonstra, o quanto é difícil prever de que modo a formação de vórtices afecta as medições do anemómetro da nacelle e o recurso a correlações torna-se numa ferramenta prática e útil para obter a velocidade do escoamento não perturbado a montante do rotor.





# Capítulo 4

## Curvas de potência

*Design das pás dos aerogeradores*

*Curvas de potência*

*Controlo de potência*



## 4.1 Design das pás dos aerogeradores

O *design* óptimo das pás de um aerogerador é uma temática complexa que envolve conhecimentos aerodinâmicos, estruturais e de controlo. O escoamento em torno da pá de um aerogerador, em virtude da rotação do rotor, possui uma cinemática distinta de um perfil de estático típico de um avião. Para uma optimização deste as pás são modeladas como uma série de secções ao longo destas. Cada secção tem a forma de um perfil alar, uma corda e um ângulo de ataque local que resulta do somatório do ângulo de torção local com o ângulo de ataque da base desta.

### 4.1.1 Design dos aerogeradores

A geometria das pás do rotor, cuja secção recta tem a forma de um perfil alar, é um factor preponderante na quantidade de energia que é extraída a cada velocidade do vento. De um modo geral, o comportamento de um perfil alar em função do ângulo de ataque  $\alpha$  pode ser dividido em três zonas de funcionamento, conforme se demonstra seguidamente.

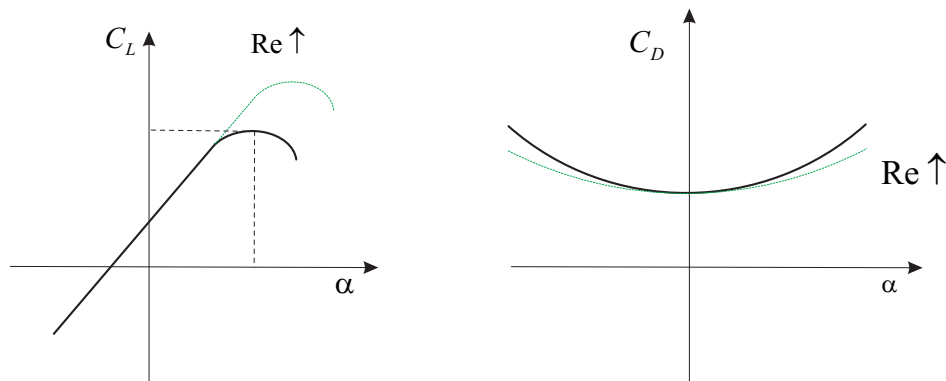


Figura 4.1: Curvas de coeficiente de sustentação e de arrasto de uma perfil alar típico

Tabela 4.1: Regime de funcionamento das pás dos aerogeradores, [Ana Estanqueiro, 1997]

Ângulo de ataque	Regime
-15° a 15°	Linear
15° a 30°	Desenvolvimento da perda
30° a 90°	Travão

O coeficiente de arrasto mantém-se aproximadamente constante até se atingir o ângulo de ataque, no qual o coeficiente de sustentação atinge o seu máximo. Para valores de  $\alpha$  superiores, o coeficiente de arrasto sofre um acréscimo acentuado, consequentemente, verifica-se um aumento significativo das forças de arrasto.

Todavia, o perfil das pás não é constante ao longo do seu raio. A necessidade de uma filosofia diferente do *design* de um perfil alar típico de forma a majorar a energia extraída encontra-se descrita na figura 4.2.

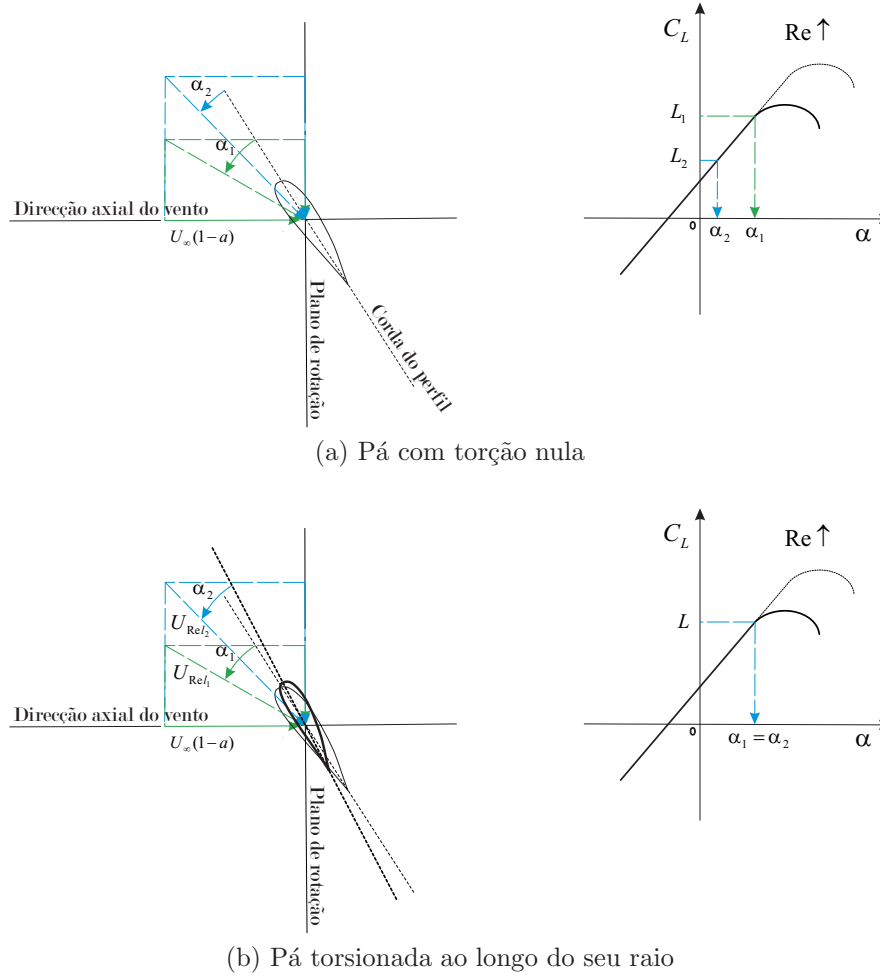


Figura 4.2: Distinção do comportamento aerodinâmico de pás torsionadas

O escoamento faceja a rotor com um determinado perfil de velocidades em que a velocidade tende a ser maior quanto maior a altura e a velocidade tangencial das pás do rotor é directamente proporcional ao longo do seu raio.

Na situação fictícia de um perfil homogéneo com a altura e velocidade angular não variável, figura 4.2a, a velocidade relativa, grandeza vectorial definida pela velocidade

axial do vento e a velocidade tangencial do elemento infinitesimal, tende a aumentar o seu azimute com o plano do rotor e a diminuir o ângulo de ataque para elementos sucessivos ao longo da pá, verificando-se uma diminuição de sustentação ao longo desta. Na presença de uma torsão ao longo da pá, o ângulo de ataque das pás é mantido constante a longo do raio desta e atinge uma majoração da energia extraída do escoamento. A sua geometria também tem em conta que o efeito de descolamento da camada limite ocorra gradualmente da raiz ao bordo da pá e desequilíbrios significativos de forças, evitando-se assim problemas estruturais.

A modelação matemática de um design óptimo das pás pressupõe, para um aerogerador de velocidade angular variável, condições óptimas de operacionalidade que dependem primeiramente, dos factores de indução. Estes podem ser obtidos pela condição de maximização do momento desenvolvido para uma determinada razão e velocidades da pá:

$$\frac{d}{da'} 8\pi\lambda\mu^2 a' (1 - a) = 0 \quad (4.1)$$

que não é mais do que a maximização da taxa de variação de quantidade de movimento. A manipulação matemática da equação (4.1) com as equações (3.29) e (3.30) permite concluir que nas condições impostas, os factores de indução são coincidentes com os obtidos pela *momentum theory*:

$$a = \frac{1}{3} \quad a' = \frac{a(1 - a)}{\lambda^2} \quad (4.2)$$

Como a condição de operacionalidade óptima depende, de igual modo, das condições de vorticidade ao longo da pá, o arranjo da equação (3.28) com o teorema de *Kutta-Joukowski*, descrito na equação (4.3) permite concluir que esta implica circulação uniforme ao longo do raio da pá.

$$L = \rho U_{rel} \Gamma \quad (4.3)$$

em que  $\Gamma$  representa o somatório da circulação de cada elemento infinitesimal da pá. De modo a quantificar a variação da corda ao longo da pá sob condições óptimas de funcionamento, é necessário uma análise das equações (3.26) e (3.28):

$$B \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 (C_l \sin \phi) c r dr = 4a' (1 - a) \rho U_{\infty} \Omega \phi r^3 dr \quad (4.4)$$

Desprezando o arrasto e segundo a relação trigonométrica das velocidades:

$$\sin \phi = \frac{U_{\infty} (1 - a)}{U_{rel}} \quad (4.5)$$

$$\sigma' = \frac{B}{2\phi} \frac{c}{R} = \frac{4\lambda\lambda_r^2 a'}{U_{rel}/U_{\infty} C_l} \quad (4.6)$$

A inclusão dos factores de indução sob condições de operacionalidade óptima:

$$\sigma' \lambda C_l = \frac{8/9}{\sqrt{\left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 + \lambda^2 \mu^2 \left[1 + \frac{2}{9(\lambda^2 \lambda_r^2)}\right]^2}} \quad (4.7)$$

O parâmetro  $\mu$  designa uma razão de velocidades local do elemento e é igual a  $\lambda$  na extremidade destas. A única incógnita da equação (4.6) é o coeficiente de sustentação, permitindo concluir que a extracção da máxima potência possível contida no escoamento inclui uma torsão da pás ao longo do seu comprimento, e o seu dimensionamento deve proporcionar um ângulo de ataque tal, que a relação entre a sustentação e o arrastamento seja máxima ao longo desta.

O dimensionamento de aerogeradores para elevadas razões de velocidade implica pás delgadas e longas. Todavia, a necessidade de inclusão de materiais condutores no bordo de fuga das pás de modo a não danificar os aerogeradores em caso de descargas eléctricas e os altos custos inerentes à sua construção, implicam que, na prática, se admita soluções de compromisso entre a *performance* das pás e a viabilidade económica da sua construção, [Tony Burton and David Sharpe, 2001].

#### 4.1.2 Efeitos da discretização dos elementos de pá

Uma aproximação é realizada quando se iguala as equações do *momentum* e *blade element theory*, presumindo que a interacção do escoamento se dá de igual modo ao longo dos elementos infinitesimais da pá. Este facto, introduz erros devido a  $a'$  crescer desde a raiz até à extremidade da pá, *tip effects*. Quando se iguala as equações que descrevem o binário e o arrasto sob o ponto de vista do *momentum* e *blade element theory*, resulta que:

$$\frac{a'}{1 - a} = \frac{\sigma' C_l}{4\lambda_r \sin \phi} \quad (4.8)$$

$$\frac{a}{1 - a} = \frac{\sigma' C_l \cos(\phi)}{4 \sin^2 \phi} \quad (4.9)$$

Das expressões (4.8) e (4.9):

$$C_l = 4\sin\phi \frac{\cos\phi - \lambda_r \sin\phi}{\sigma'(\sin\phi + \lambda_r \cos\phi)} \quad (4.10)$$

$$a = \frac{1}{1 + 4\sin^2(\phi)/\sigma' C_l \cos\phi} \quad (4.11)$$

$$a' = \frac{1}{4\cos(\phi)/\sigma' C_l - 1} \quad (4.12)$$

$$\frac{a}{a'} = \frac{\lambda_r}{\tan\phi} \quad (4.13)$$

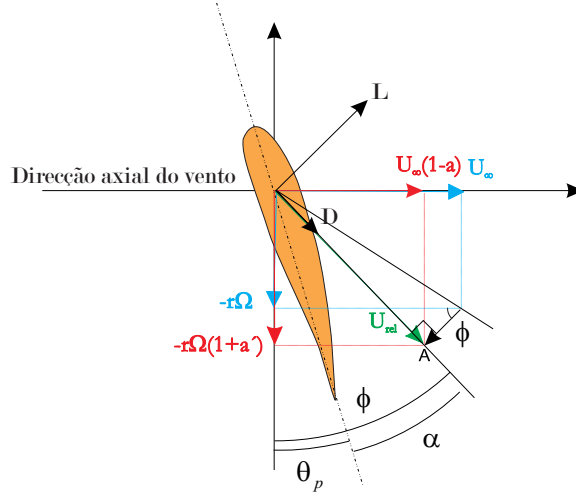


Figura 4.3: Representação gráfica da equação (4.13)

A interpretação geométrica da equação (4.13) encontra-se representada na figura 4.3. A aproximação de que o escoamento em torno dos elementos bidimensionais é independente, apenas se mantém válida quando o ângulo  $A$ , entre a velocidade relativa e induzida, é ortogonal. Fora deste contexto, a equação (3.27) deverá ser multiplicada pelo factor de correcção proposto por Prandtl's,  $F$ , definida por, [L Prandtl and O.G. Tietjens, ]:

$$F = \frac{2}{\pi} \arccos(e^{-f}) \quad (4.14)$$

sendo  $f$  definido por:

$$f = \frac{B}{2} \frac{R - r}{R \sin\phi} \quad (4.15)$$

Em que  $B$  e  $R$  são, respectivamente, o número e raio das pás do aerogerador.

## 4.2 Curvas de potência

Os modelos de modelação do *design* das pás dos aerogeradores ainda contém muitas limitações. O escoamento na esteira é altamente tridimensional e a maior parte dos modelos não têm em conta estes efeitos, especialmente na raiz da pá. Para a velocidade específica local  $\lambda_p = 0$ , os coeficientes de potência locais são nulos quando aplicada a *Theory Element Momentum Blade*. Contudo, é possível obter coeficientes de potência superiores ao de Betz quando incluídos simultaneamente os efeitos de expansão e da queda de pressão estática na esteira, [de Vries, 1979].

O resultado da aplicação destes modelos por parte dos fabricantes, culminam num sumário, sob a forma de representação gráfica ou tabular, da potência que se pode obter deste em função de uma gama de velocidades do vento em que está preparado para operar designado curva de potência. Esta, é dos factores mais marcantes para o aproveitamento potencial eólico e para uma correcta estimativa deste. Geralmente, este apresenta 4 zonas distintas de velocidades de vento:

1. Uma primeira zona, *cut-in*, que corresponde a ventos de baixas velocidades e devido à lei de variação cúbica da potência em função do vento o aerogerador extrai uma quantidade de energia reduzida
2. Quando a velocidade do vento se torna apreciável, é permitido ao rotor rodar. Nesta zona, a potência produzida pelo aerogerador é aproximadamente proporcional à velocidade do vento
3. A partir de uma determinada velocidade de vento os mecanismo de controlo de potência do aerogerador actuam, de um modo activo ou passivo, e mantêm a rotação do rotor controlada, limitando assim a potência gerada pelo aerogerador.
4. Na ocorrência de velocidades extremas de vento, os aerogeradores desligam e diminuem abruptamente a velocidade do rotor por questões de estabilidade e segurança

As curvas de potência e a desempenho de um aerogerador podem ser caracterizadas em três termos dependentes da velocidade do vento: potência, binário e impulso axial. O seu desempenho é normalmente estudado em função de um coeficiente adimensional por velocidade específica da pá, *tip speed ratio*, definido por:

$$\lambda = \frac{\omega R}{u} \quad (4.16)$$



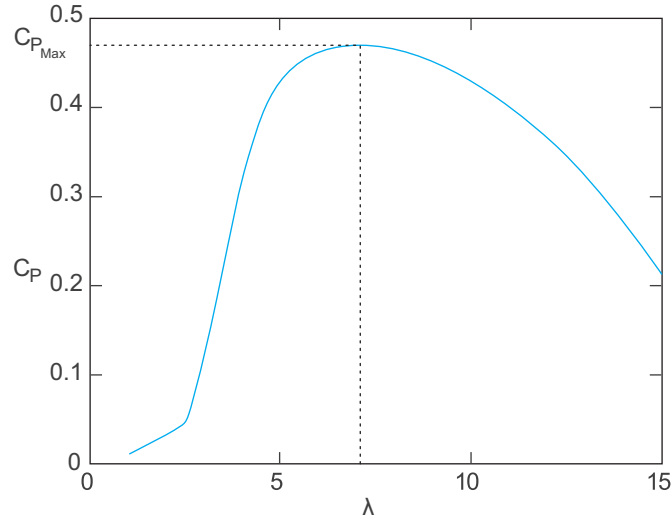


Figura 4.4: Curva de performance típica de um aerogerador

A curva de  $C_p$  de um aerogerador é fortemente dependente do valor da rotação do rotor e na prática procura-se manter  $\lambda$  num ponto óptimo de  $\lambda$  em que se consegue obter um máximo rendimento. Contudo, tal não é possível na realidade.

È possível observar da figura 4.5 o desempenho de um aerogerador típico em função da velocidade do vento sob condições reais de funcionamento.

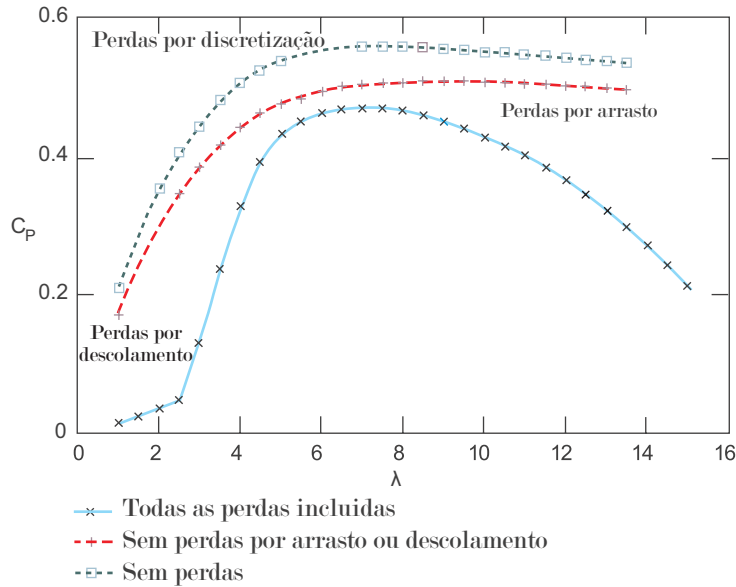


Figura 4.5: Comparação das curvas de desempenho, [Tony Burton and David Sharpe, 2001]

Para valores óptimos de  $\lambda$  a discrepância deve-se sobretudo ao arrasto e aos pressupostos intrínsecos à teoria BEM e nem na ausência de perdas se consegue atingir o *limite*

de Betz. O máximo de coeficiente de potência ocorre para uma velocidades específicas em que os factores de indução se aproximam de  $\frac{1}{3}$  que corresponde ao *limite de Betz*. Para velocidades específicas baixas os perfis aproximam-se das condições de descolamento da camada limite e os factores de indução diferem significativamente desse máximo. Para velocidades de vento pequenas, isto é, elevadas velocidades específicas, predomina o arrasto e o aproveitamento energético do escoamento é reduzido.

### 4.3 Controlo de potência

Com a expansão do mercado da energia eólica, inovam-se arquitecturas de controlo de potência com o objectivo de otimizar as condições de extracção de energia do vento através dos aerogeradores. Primordialmente, a arquitectura mais simples de controlo de potência assentava no uso de um ângulo de ataque constante. Todavia, da figura 4.4 percebe-se que um aerogerador a operar sobre estas condições só pode majorar o seu rendimento para uma única velocidade do escoamento. Este facto leva à necessidade de se adaptar uma estratégia diferente de forma a majorar a energia extraída baseada na variação do ângulo de ataque das pás.

Sistemas de velocidade angular variável permitem capturar mais energia do que os sistemas de velocidade angular fixa. Estes últimos, devido às suas características, levam a que frequentemente os aerogeradores se encontrem sobre regimes de funcionamento não óptimo.

A tarefa de regulação de potência, normalmente, pode ser obtida por meios passivos ou activos. No entanto, existem outras soluções, como o uso de *flaps* cujo princípio de funcionamento é idêntico ao dos aviões. Outra solução possível, geralmente aplicada a aerogeradores de baixa potência, é desfasar o rotor da direcção do vento, *yaw*. Do ponto de vista prático, para aerogeradores de grande porte, todo a sua estrutura poderia ser posta em causa devido aos esforços cíclicos a que este iria ser sujeito e a sua aplicabilidade é impossível.

O mecanismo de controlo inerente ao aerogerador afecta a forma da sua curva de potência. As curvas de potência típicas de um aerogerador com controlo de potência activo e passivo encontram-se graficamente esquematizadas na figura 4.6.

Os sistemas designados vulgarmente por *stall*, são aqueles em que o ângulo de ataque da pá é projectado de modo a ser fixo para que, na ocorrência de velocidades elevadas, que poderiam pôr em causa a estabilidade estrutural do aerogerador, diminuam as forças de sustentação aproveitando o fenómeno de descolamento da camada limite.

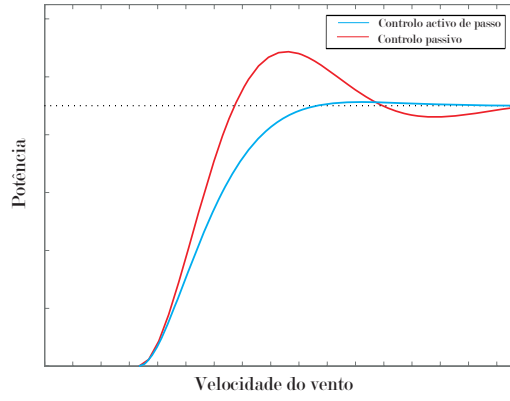


Figura 4.6: Curvas de potência para distintas tipologias de controlo de potência

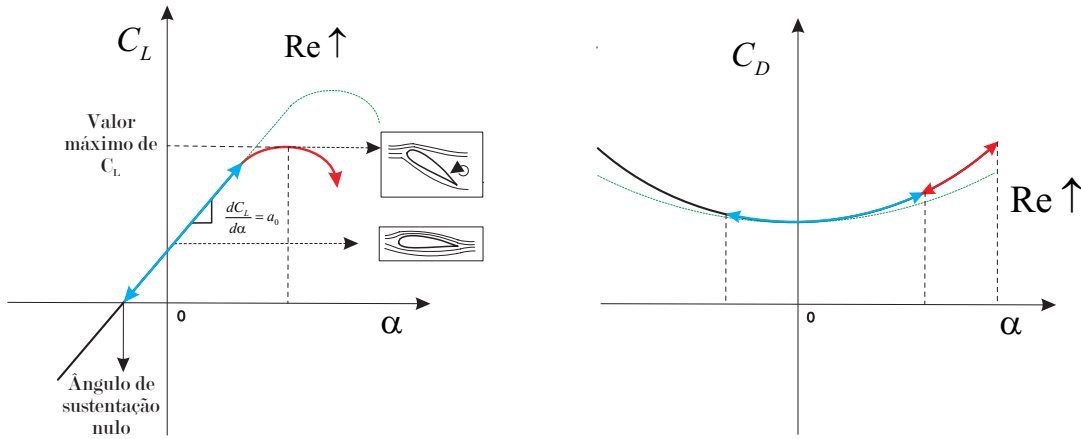


Figura 4.7: Coeficientes de sustentação e arrastos típicos de um perfil alar

São sistemas de carácter simples, e a sua estratégia assenta essencialmente nas características aerodinâmicas das pás. No entanto, devido ao descolamento, as forças de arrasto envolvidas nestes sistemas são de maior intensidade e este, na ocorrência de velocidades elevadas, opera nas zonas delineadas a vermelho da figura 4.7.

Os que possuem a capacidade de controlar o ângulo de ataque, por meio de mecanismos internos do aerogerador que permitem a rotação da pá em torno do seu eixo longitudinal, designam-se por controlo activo *active pitch*. Nos dias de hoje, o controlo de potência por meios passivos tem vindo a cair em desuso devido a tornar os aerogeradores mais susceptíveis a fenómenos de fadiga.

De um modo geral, a curva de potência de um aerogerador com controlo passivo possui um carácter mais sinuoso do que a de controlo activo. Quando são atingidas as velocidades nominais do aerogeradores, há um "overshooting" da potência na transição para plena carga e um aumento gradual da intensidade do vento revela flutuações ligeiras

de potência.

Da figura 4.6 denota-se um excedente de potência resultado da natureza complexa do descolamento da camada limite. A observação o descolamento da camada limite não é idêntica aos perfis testados estáticamente foi estudada por Himmelskamp [Himmelskamp, 1992]. Este efeito é mais acentuado na base da pá, diminui ao longo do raio do rotor e o seu reflexo na curva de potência é um excedente da potência nominal do aerogerador na passagem para plena carga.

Este facto tem sido largamente debatido e estudado pela comunidade científica, no entanto, a sua explicação física ainda é uma incógnita. Apenas existe um consenso que a natureza oscilatória da zona de esteira e o gradiente de pressão adverso a que o escoamento está sujeito nas pás do rotor, é diminuído devido à sua rotação e estes são factores determinantes para o suceder deste fenómeno.

Após o descolamento verifica-se que a potência nominal oscila em torno da potência nominal. Isto deve-se ao facto de em plena carga, as pás do aerogerador depararem-se com um descolamento da camada limite de natureza dinâmica devido a complexidades espaciais e temporais de natureza estocástica [H. Snel et al., 1993].

O aerogeradores que irão permitir o estudo da medição da curva de potência via anemómetro na nacelle, apresentam um comportamento particular a velocidades extremas.

Na figura 4.8a encontram-se esboçadas o comportamento das curvas de potência a velocidades extremas, [Enercon, 2006].

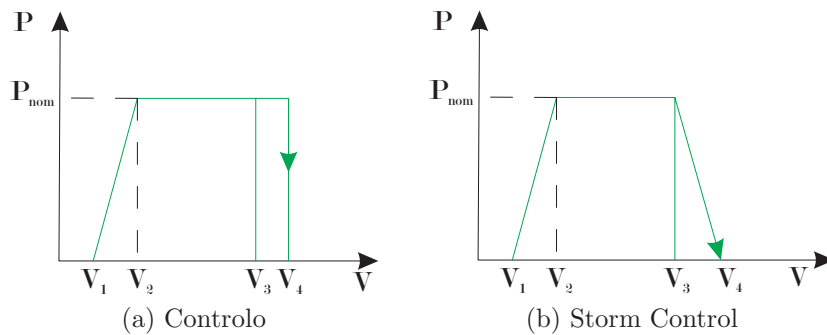


Figura 4.8: Comparação das curvas de potência para velocidades extremas

Através de um algoritmo de controlo, o aerogerador em vez de desligar súbitamente, reduz de uma forma gradual a rotação do rotor. Assim, quando verificadas condições severas durante períodos relativamente curtos, este mantém-se com velocidades de rotação baixas permitindo gerador potência eléctrica voltar a plena carga rapidamente quando retomadas condições de vento aceitáveis.

Todavia, as vibrações na nacelle durante estes períodos são de tal ordem, que existe a forte possibilidade de activação dos sistemas de segurança do aerogerador, o que levanta questões quanto aos periodos de inoperacionalidade que se podem verificar em condições adversas e que levam a um desaproveitamento da energia.



# Capítulo 5

## Medição da curva de potência

*Equipamentos de medição*

*Norma IEC61400- Parte 12-1*

*Norma IEC61400- Parte 12-2*





# Introdução

Uma correcta avaliação da curva de potência de um aerogerador implica necessariamente uma análise da adequação dos instrumentos de medição assim como de uma metodologia credível que suscite um nível de confiança aceitável.

A inexistência de métodos precisos para uma avaliação da capacidade produtiva dos parques eólicos torna-se num grave problema para um mercado que se encontra em franca expansão. É imperativo identificar e avaliar todos os eventos perturbadores da avaliação das curvas de potência de maneira e mitigar a incerteza associada a cada um deles. De maneira a ser possível dar resposta a este facto, é necessário conceber uma metodologia normalizada que permita caracterizar a curva de potência e a estimativa de produção anual (AEP) com suficiente precisão.

A IEC (International Electrical Commission) é uma instituição de âmbito mundial, compreendendo um grande número de comités nacionais. O principal objectivo da IEC é a promoção da cooperação internacional em todas as questões relacionadas com a normalização nos campos da electricidade e electrónica. Com vista a este fim, entre outras actividades, a IEC publica regularmente normas internacionais.

Esta tem presentemente editada a norma IEC61400-12-1 [bib, 2005] que permite a avaliação das curvas de potência baseada em estações anemométricas com o mínimo de interferência. Inicialmente foi sugerido o uso do anemómetro da *nacelle* para avaliação das curvas de potência, mas o facto de este se encontrar em um zona muito perturbada do escoamento levou a não se adoptar o seu uso. No entanto, os promotores dos parques eólicos estão interessados numa célere construção do parque e recorrer ao anemómetro da *nacelle* torna-se muito atractivo do ponto de vista económico, como desafiante para os especialistas.

Para conceber um procedimento credível e com resultados precisos, prepara-se para lançar uma nova norma para a avaliação das curvas de potência recorrendo ao anemómetro da *nacelle* designada de IEC 61400-12-2 [bib, 2008].

## 5.1 Equipamentos de medição

A precisão de todo este processo requer, em primeira instância, um estudo profundo de todas as limitações da instrumentação para medição. Estes, como primeiro intervenientes do processo de medição, devem ser usados de forma correcta e privados de variáveis intrínsecas à medição que diminuam a sua precisão.

## Estação anemométrica

As campanhas de medição das características do vento visando o seu aproveitamento energético assim como a medição da curva de potência, passa obrigatoriamente pela instalação de uma torre para a colocação dos equipamentos de medição das características do escoamento.

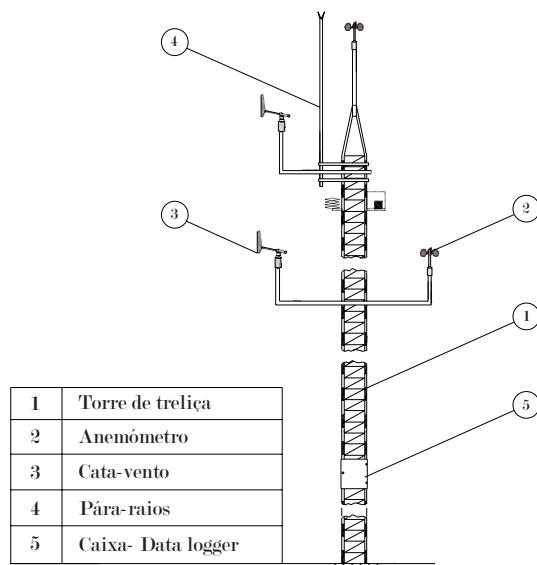


Figura 5.1: Estação anemométrica (Cortesia do INEGI)

Na figura 5.1 faz-se a representação esquemática de uma torre típica de medição. A recolha de informação, realizada através dos aparelhos instalados na própria torre, deverá decorrer, pelo menos, durante um ano, para que o conjunto de dados recolhido incorpore correctamente a sazonalidade típica dos regimes de ventos observados em locais de latitude significativamente diferente da do equador.

O local previsto para instalação da torre deverá respeitar duas importantes premissas:

1. Deverá situar-se longe de qualquer obstáculo que interfira no escoamento
2. Deverá localizar-se num ponto representativo da área em análise

Desta forma garante-se a representatividade das medições. Refere-se porém, que devido às características dos terrenos em estudo, quer da sua natureza orográfica, quer da sua extensão, o respeito pela segunda premissa nem sempre é facilmente atingido. É norma geral que a altura da torre de medição se situe o mais próximo possível da altura previsível do eixo do rotor dos aerogeradores a instalar no local, minorando assim a incerteza associada a posteriores cálculos.

## O anemómetro

As características de vento alvo de medições são fundamentalmente a velocidade e a direcção. Os instrumentos utilizados, para a medição de qualquer uma delas, deverão respeitar um conjunto de parâmetros que assegurem o seu bom funcionamento durante toda a campanha de medição.



Figura 5.2: Anemómetro de copos

Deverão ser fiáveis, precisos e ser seleccionados tendo em conta as condições ambientais em que irão trabalhar, seja de temperatura, de humidade e ventos extremos, seja a presença de sal ou de pó. Por fim, deverão ser de fácil substituição. Para a medição da velocidade do vento recorre-se na maioria das situações a anemómetros de copos, [Ower and E. Pankhurst, 1997].

Embora de utilização universal, os anemómetros de copos exibem algumas debilidades que é necessário salientar. Na ocorrência, de situações em que a componente vertical do escoamento é relevante, o valor da velocidade medida se afasta do valor real da velocidade do fluxo de ar. Idealmente, o comportamento do anemómetro deveria ser insensível a esta variação, pois o seu propósito é a medição da velocidade do escoamento incidente nas pás de um aerogerador, [R. Gash and J. Twele, 2002].

Por outro lado, a massa associada ao sistema de copos e hastes e as fricções internas causam um amortecimento das variações do vento, podendo levar a imprecisões quando se tenta analisar a variação da velocidade do vento em períodos de curta duração. Este comportamento é descrito sob a forma da constante de distância do anemómetro, um parâmetro análogo ao tempo de resposta de um aparelho, mas medido em termos de distância percorrida pelo fluxo de ar até que o anemómetro atinja 63% da variação da velocidade.

A definição deste parâmetro tem por base a aplicação da Lei de Conservação da Quantidade de Movimento ao sistema anemómetro/fluxo de vento e ignorando efeitos de interferência aerodinâmica e de fricção interna, [bib, 1999]. Para anemómetros de copos com a forma do exibido na figura 5.1 a constante de distância situa-se tipicamente entre 2.5 e 3.5 m, podendo atingir os 2 m para os anemómetros de melhor desempenho.

Sabe-se também que um anemómetro de copos tem uma resposta mais rápida quando a velocidade aumenta do que quando esta diminui. Este fenómeno, conhecido por *overspeeding*, origina uma sobre-estimativa do valor da velocidade medida pelo anemómetro. A sua contabilização é também conseguida pela constante de distância, sendo que esta deverá ser a mais baixa possível de forma a minorar o referido desvio.

Sempre que se suspeite de ventos com elevadas componentes verticais, elevadas turbulências ou se deseje medir a variação do vento em intervalos de tempo reduzidos deverá ser encarada a utilização de outro tipo de instrumentos de medição. Para estas situações, e pela ausência de órgãos mecânicos, um boa alternativa são os anemómetros ultra sónicos, os SODARES ou os LIDARES.

## O sensor de direcção

A medição da direcção do vento é feita tipicamente por recurso a um sensor de direcção, vulgarmente designado por catavento. A forma mais familiar deste equipamento é caracterizada por uma pequena "barbatana" ligada um eixo vertical. Assim, o catavento está constantemente em busca de equilíbrio, procurando o seu alinhamento com a direcção do escoamento. A conversão da posição do catavento para um sinal eléctrico é conseguida por um potenciómetro. Na figura 5.3 mostra-se o aspecto típico de um catavento.



Figura 5.3: Catavento

À semelhança dos anemómetros, também os cataventos demonstram uma certa inércia na mudança de posição, característica designada por limiar de resposta ou *threshold*, tipicamente próximo de 1 m/s. Nas alturas de quase ausência de vento, o catavento assume um comportamento errático, rodando sem tendência aparentemente definida. No entanto, acima deste limiar de velocidade, esta conduta não é novamente observada.

Na fase de colocação dos instrumentos na torre é necessário acautelar a influência desta no escoamento, instalando os sensores a uma distância que minore este efeito. Igualmente, a haste horizontal de suporte dos instrumentos de medição é fonte causadora de distorção do escoamento, pelo que todos os instrumentos devem guardar-lhe uma distância mínima.

## 5.2 Norma IEC61400- Parte 12-1

A norma IEC61400 - Parte 12-1 especifica um procedimento para a medição do desempenho, e da incerteza resultante dessas medições, de um aerogerador ligado à rede eléctrica recorrendo a estações anemométricas de medição. A sua metodologia pode ser usada para avaliar o desempenho de aerogeradores específicos em locais diferentes, assim como, para estabelecer comparações entre diferentes modelos e configurações técnicas.

A caracterização do desempenho de um aerogerador é determinada pela medição da curva de potência e a estimativa de produção anual expectável (AEP). A medição da curva de potência envolve a colecta de dados de vento e de potência, simultâneos, durante um período de tempo que seja estatisticamente representativo das condições do local.

Uma estação anemométrica deverá ser montada a uma distância de 2 a 4 diâmetros do aerogerador. Não deverá ser excessivamente próxima deste, visto que, a presença do aerogerador influencia o escoamento na sua vizinhança, nem excessivamente longínqua, devido à diminuição da correlação entre a velocidade registada na estação e a verificada ao nível do rotor.

Todos os aparelhos para a instrumentação e medição do processo deverão verificar uma série de requisitos mínimos para uma majoração da precisão. Previamente à medição da curva de potência é necessário avaliar todos os intervenientes no processo e a adequação do sector de medição. Este é um factor preponderante para o êxito de todo este processo e direcções de vento influenciadas pela presença de obstáculos, zonas de esteira de outros aerogeradores ou de variação topográficas acentuadas deverão ser excluídas.

## Descrição geral da metodologia

Todo o processo de medição da curva de potência de um aerogerador pode ser sucintamente descrito pelo seguinte organograma:

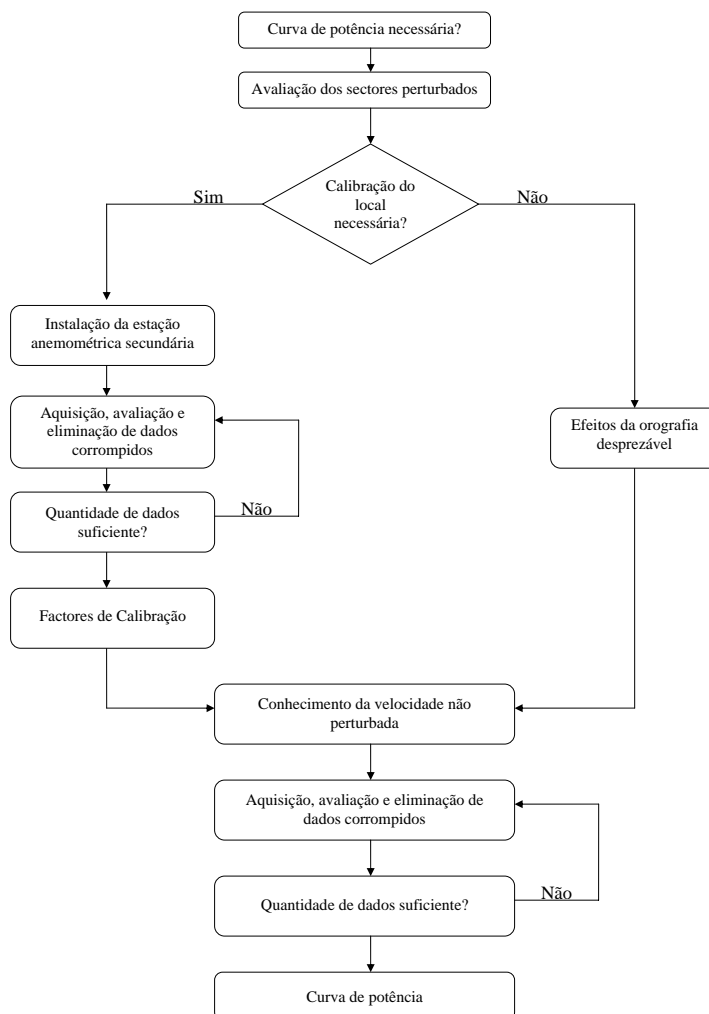


Figura 5.4: Metodologia para a medição da curva de potência - IEC61400 Parte 1

A metodologia de medição da curva de potência, em primeira instância, remete para uma caracterização completa da complexidade da orografia do local. Este é dos intervenientes de maior relevância em todo o processo e o seu correcto ajuizamento diminui a incerteza da curva de potência medida.

A topografia do local define a necessidade de se proceder previamente a uma calibração do local de forma a aferir a velocidade não perturbada ao nível do rotor do aerogerador. Na presença de um terreno circundante com pequenas variações relativamente ao

plano horizontal, a calibração do local é dispensável e a velocidade medida pela estação anemométrica é suficientemente representativa sobre as distâncias estipuladas por esta.

Terrenos de orografia complexa necessitam de um procedimento que quantifique e reduza potencialmente os efeitos do terreno. Esse procedimento, designado anteriormente de calibração do local, pressupõe o recurso a uma segunda estação anemométrica, no local onde será implementado o aerogerador, de forma a corrigir a diferença sistemática entre a velocidade registada no anemómetro da estação e a velocidade não perturbada à altura do rotor.

A presença de aerogeradores, obstáculos, etc. devem ser devidamente avaliados segundo uma metodologia que permite mitigar os seus efeitos nas medições realizadas.

Os aerogeradores no qual se pretende medir a curva de potência, não devem encontrar-se sobre a influência de zonas de esteira de outros aerogeradores na vizinhança e o seus efeito deve ser cancelados. A norma impõe uma distância mínima entre aerogeradores, dois a quatro diâmetros, de forma a anular esse efeito, contudo, na ausência de movimento do rotor de aerogeradores vizinhos admite uma análise semelhante à de um obstáculo.

Entende-se como obstáculos, árvores, prédios, etc. que influenciem em mais de 1% a velocidade do escoamento no trajecto contido desde a estação anemométrica de referência ao aerogerador. A determinação dos sectores perturbados é obtida através de expressões que solicitam o conhecimento da distância do obstáculo à estação anemométrica e a suas características geométricas.

## Medição da curva de potência

Providenciado a exclusão de sectores perturbados, procede-se à iniciação da curva de potência do aerogerador. As medições deverão englobar velocidades, temperaturas, pressão e ser efectuadas a uma frequência de  $1Hz$  sendo posteriormente apresentadas sob a forma de médias de 10 minutos com o respectivo máximo, mínimo e desvio padrão.

A atribuição de um intervalo de 10 minutos como representativo da velocidade do vento é fundamentado por trabalhos realizados por Van der Hoven que, numa abordagem estatística do comportamento do vento concebida através da análise espectral permitiu identificar as zonas macro-meteorológica, de vazio espectral e de turbulência no espectro do vento.

Da figura 5.2 é possível identificar um zona de vazio espectral, compreendida entre 2 horas e 10 minutos que demonstra que os fenómenos associados a frequências de vento diária e sazonal são claramente distintos dos associados à turbulência. Com intervalos

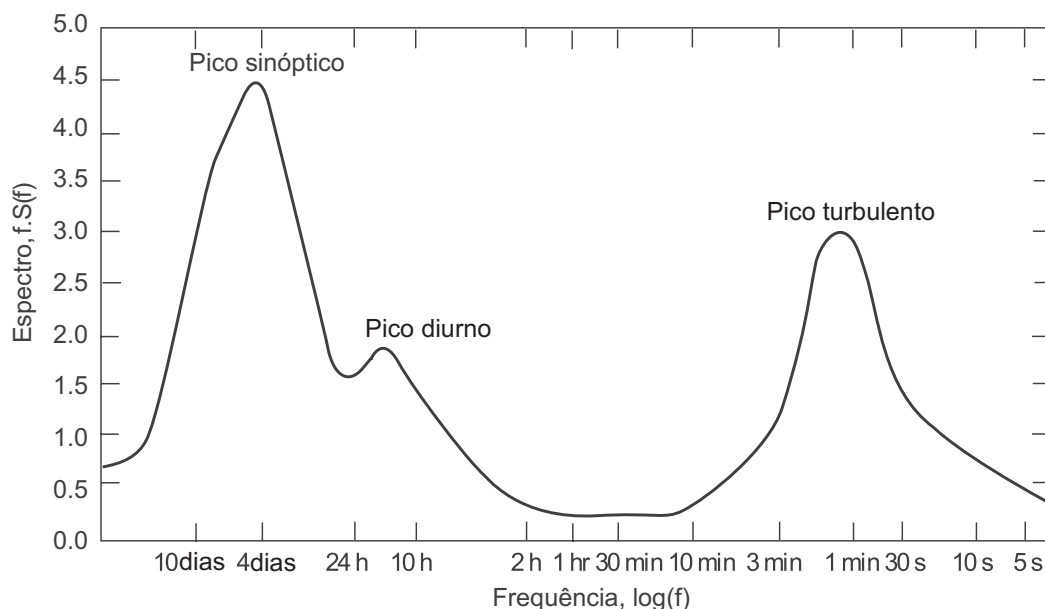


Figura 5.5: Espectro de energia do vento

temporais superiores a análise tornar-se-ia grosseira, "limpando" fenómenos importantes. Intervalos de integração menores exigiriam maiores recursos em unidades de memória extra, tornando os equipamentos de registo de dados muito mais caros, sem ganhos assinaláveis na qualidade da caracterização do regime de ventos.

A campanha de medição da curva de potência deve assegurar o uso de dados em que o aerogerador se encontra no seu estado normal de operacionalidade. Situações que envolvam falhas de equipamento e de rede, alteração dos parâmetros de funcionamento do aerogerador ou funcionamento anómalo deste, deverão ser excluídos da base de dados e construído um histórico sobre a sua exclusão.

A colecta de dados por um período suficientemente longo que represente as condições do local, deverá proporcionar um volume de ocorrências suficientemente aceitável que fiabilize a curva de potência medida resultante. Esta deverá evidenciar o efeito de histerese presente no algoritmo de controlo do aerogerador, assim como a presença de correntes parasitas para velocidades inferiores ao cut-in. De igual modo, é aconselhado a realização de históricos das medições sob condições atmosféricas adversas. Na presença de variações da frequência superiores da rede interna do parque a um hertz, recomenda-se a criação de um histórico sob estas condições.

A concretização de uma base de dados suficientemente extensa, permite definir a curva de potência do aerogerador. As curva de potência de um aerogerador regularmente encontram-se referenciadas à massa volúmica de  $1.225 \text{ Kg/m}^3$  e a sua comparação com



a determinada no local é distinguida em função do tipo de controlo de potência. A normalização da velocidade não perturbada no rotor para aerogeradores com mecanismos de *stall* e controlo de passo é dado respectivamente por:

$$P_n = P_{10min} \frac{\rho_0}{\rho_{10min}}$$

$$V_n = V_{10min} \left( \frac{\rho_{10min}}{\rho_0} \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)}$$

Em que  $V_n$  e  $P_n$  é a velocidade e potência normalizada. A determinação da curva de potência é realizada segunda a metodologia de Akins, [Akins, 1978], vulgarmente apelidada por metodologia dos *bins*, e pressupõe a média aritmética da velocidade e potência das ocorrências segundo uma intervalos de velocidades equidistanciados de 0.5 m/s.

### 5.3 Norma IEC61400 - Parte 12-2

Esta normativa apresenta uma metodologia alternativa à norma IEC61400 - Parte 12-1 para a determinação da curva de potência. A descrição seguinte é baseada uma versão temporária desta e podem ser sujeitas a alterações.

A sua metodologia é similar à anteriormente descrita no aspecto em que é necessário determinar a velocidade não perturbada à altura do rotor, definida pela componente horizontal do escoamento que existiria na ausência deste. Todavia, a forma de obtê-la é a diferença proeminente desta, sendo todo o processo posterior semelhante.

Nesta a velocidade do escoamento é obtida por intermédio da velocidade medida pelo anemómetro na *nacelle* e assume-se que devido à sua proximidade ao centro do rotor, os efeitos induzidos no escoamento pela orografia e obstáculos circundantes são menos relevantes. Contudo, a presença do rotor provoca uma distorção significativa no escoamento que têm de ser contabilizada por intermédio de um função transferência que permita medir a velocidade não perturbada através das medições do anemómetro na *nacelle*.

A avaliação dos factores de distorção do escoamento torna necessário dar aos diferentes intervenientes um enquadramento, definindo uma série de procedimentos correntes em que os resultados proporcionem, não só um juízo sobre a verdadeira correlação entre as velocidades, mas também uma metodologia prática para a sua aplicação.

Para tal, a aplicação desta norma propõe uma metodologia para o avaliameto de potenciais factores de distorção e de erro como:

1. As características operacionais e calibração do anemómetro
2. A influência da orografia do local
3. A influência dos factores de distorção induzidos pelo rotor

Esta revela-se potencialmente promissora em terrenos em que a norma IEC61400-Parte 1 é inviabilizada devido a complexidades orográficas, todavia, é necessário acautelar sobre as limitações desta metodologia.

A função de transferência determinada é similar sob a condição de parâmetros de controlo do aerogerador semelhantes ao longo do período de medição da curva de potência. De igual modo, a sua adequabilidade depende fortemente da inclinação do escoamento e uma função transferência determinada previamente pode não ser transmissível para outros locais.

Outro ponto importante, é que presume que a correlação da velocidade não perturbada e a curva de potência resultante não são dependentes da sazonalidade do vento o que poderá acarretar um elevado grau de incertezas.

A necessidade de conhecer a função entre a velocidade medida pelo anemómetro da *nacelle* e a velocidade não perturbada requer uma base de dados suficientemente representativa qualitativamente e quantitativamente para determinar precisamente a curva de potência. Durante o período de medição aerogerador deverá encontrar em normal funcionamento, os sistemas de aquisição de dados deverão encontrar-se sincronizados com uma frequência de aquisição de  $1Hz$  e todos os parâmetros referentes ao controlo do aerogerador deverão possuir um histórico.

O resultado será um ratio para cada bin entre a velocidade não perturbada e do anemómetro na *nacelle*. Alternativamente, pode ser criada um ajustamento matemático pelos bins de velocidades não referenciando limitações sobre o grau escolhido. Contudo, esta acautela para a variabilidade desses ratios sectorialmente e incita a sua indagação e correcção em intervalos equidistanciados de  $10^\circ$ .

A definição da função transferência permite através da velocidade do anemómetro conhecer a velocidade não perturbada e o processo de medição posterior é idêntico à norma anterior.

Posto isto, todo o processo de aquisição da curva de potência pode ser resumidamente descrito pelo seguinte organograma:

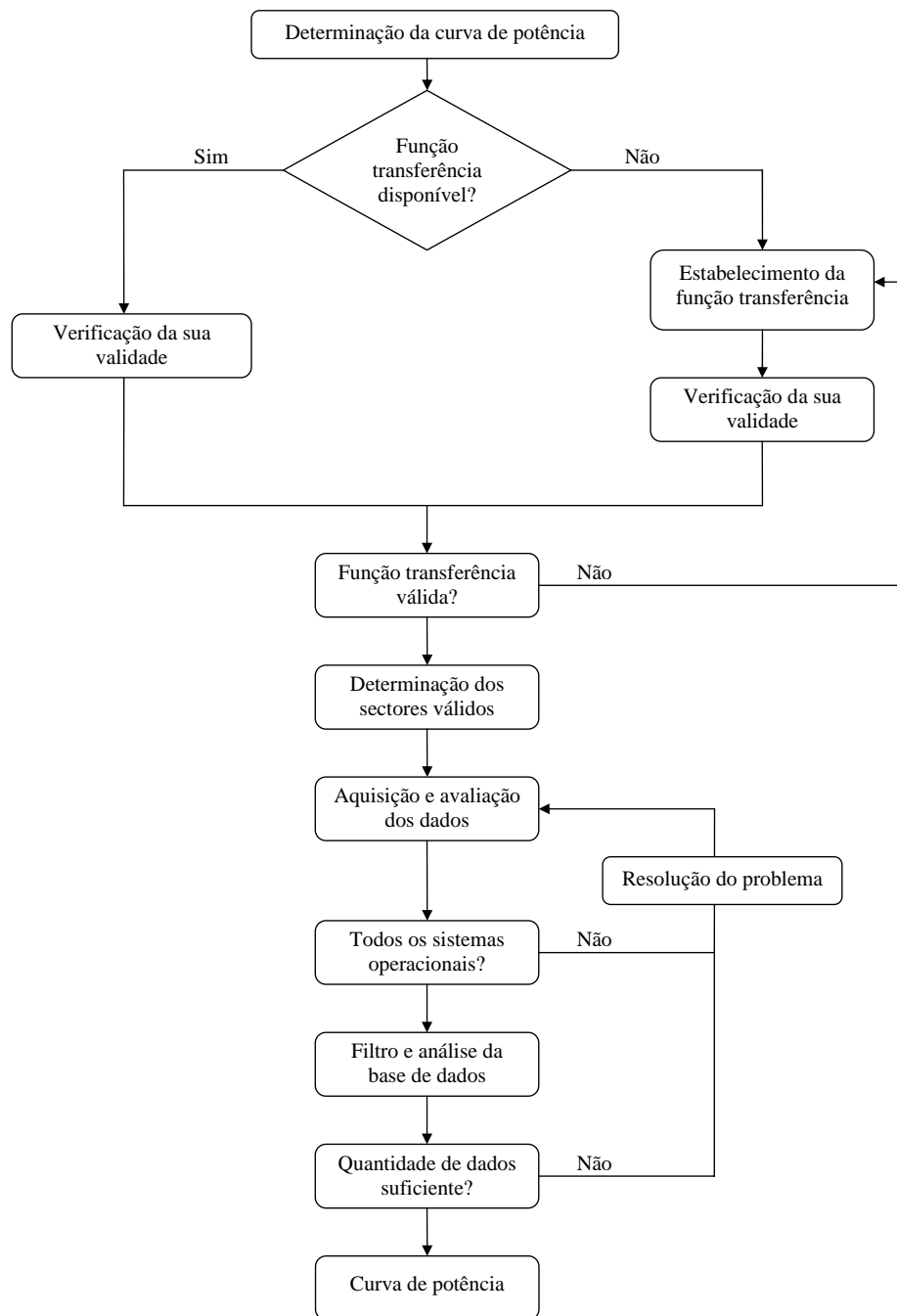


Figura 5.6: Metodologia para a medição da curva de potência - IEC61400 Parte 2

## Validade da função transferência

Esta metodologia de medição da curva de potência requer uma função transferência. Essa função transferência determina a velocidade não perturbada à altura do rotor na ausência do aerogerador nessa posição.

Tipicamente, essa função transferência só é válida para determinados parâmetros de funcionamento do aerogerador, inclinações do escoamento e desalinhamentos com o rotor. Todos estes factores devem ser avaliados para verificar se uma determinada função transferência previamente determinada, é suficiente representativa noutro local ou sobre outras condições de funcionamento.

Caso não corresponda, todo o procedimento de determinação da função transferência descrito na secção anterior deve ser realizado.

Para avaliar se uma função transferência é válida noutros aerogeradores, ou no mesmo passado algum tempo, os principais intervenientes no processo devem cumprir determinados requisitos.

A frequência de aquisição que permitiu obter a função transferência, deverá ser idêntico ao utilizado no processo de medição da curva de potência. O anemómetro na *nacelle*, assim como o catavento, devem de ser do mesmo tipo que permitiu obter a função transferência. O local onde se encontram posicionados não deve diferir em menos de 100 mm da posição dos instrumentos de medição, que permitiram obter a função transferência que se pretende aplicar.

As complexidades introduzidas pelo rotor no escoamento são de grande magnitude. Daí, as configurações de controlo das pás do rotor, assim como o seu *software* deverão ser idênticos.

A metodologia da norma IEC61400 Parte 12-2 demonstra-se bem arquitectada e coerente. Contudo, a sua versão ainda é provisória e baseada em experiências acumuladas. Tendo em vista a identificação dos factores de influência no anemómetro na *nacelle* e uma avaliação da adequabilidade da norma, foi adoptado o caso de estudo dos parques eólicos de Candal/Coelheira e Outeiro.

# Capítulo 6

## Descrição dos casos de estudo

*Parque eólico de Candal/Coelheira*

*Parque eólico do Outeiro*



## 6.1 Parque eólico de Candal/Coelheira

O parque eólico de Candal e Coelheira situa-se entre a Serra da Freita e São Macário. Estas são elevações de Portugal Continental que possuem, respectivamente, 1085 e 1052 metros de altitude máxima na orientação Noroeste-Sudeste e ficam na freguesia de Albergaria da Serra, concelho de Arouca.

O parque eólico de Candal/Coelheira é composto por dois sub-parques, Candal e Coelheira, equipado cada um com 10 aerogeradores ENERCON E70 E4, perfazendo ambos 40 MW de potência instalada. Os aerogeradores 8 e 12, pertencem a Candal e Coelheira, respectivamente, e são objecto de estudo para a determinação dos factores de distorção induzidos pelo rotor. Para tal, recorreu-se às suas estações anemométricas de referência, PORT309 e PORT312.

### Topografia



(a) Norte



(b) Sul



(c) Este



(d) Oeste

Figura 6.1: Topografia em torno ao aerogerador 8



(a) Norte



(b) Sul



(c) Este



(d) Oeste

Figura 6.2: Topografia em torno ao aerogerador 12

As figuras 6.1, 6.2 e 6.3 permitem uma avaliação dos acidentes orográficos de Candal e Coelheira. O relevo circundante ao aerogerador 8 é relativamente plano, apresentando inclinações significativas apenas na direcção correspondente ao Norte geográfico.

O aerogerador 12, encontra-se inserido num terreno de maior complexidade, com as direcções contidas entre Norte e Este bastantes íngremes. A conformidade do terreno foi determinada segundo a norma IEC61400-12 e a avaliação de componentes de vento verticais depende fortemente da inclinação deste.

## Rugosidade

A rugosidade de uma superfície é determinada pelo tamanho e a distribuição dos elementos que a compõem e é normalmente parametrizada com uma escala de comprimentos designada por rugosidade superficial  $z_0$ , havendo uma correspondência entre as características superficiais do terreno e este parâmetro. Se a área em causa não apresentar uma rugosidade uniforme, é necessário elaborar um mapa de rugosidades.



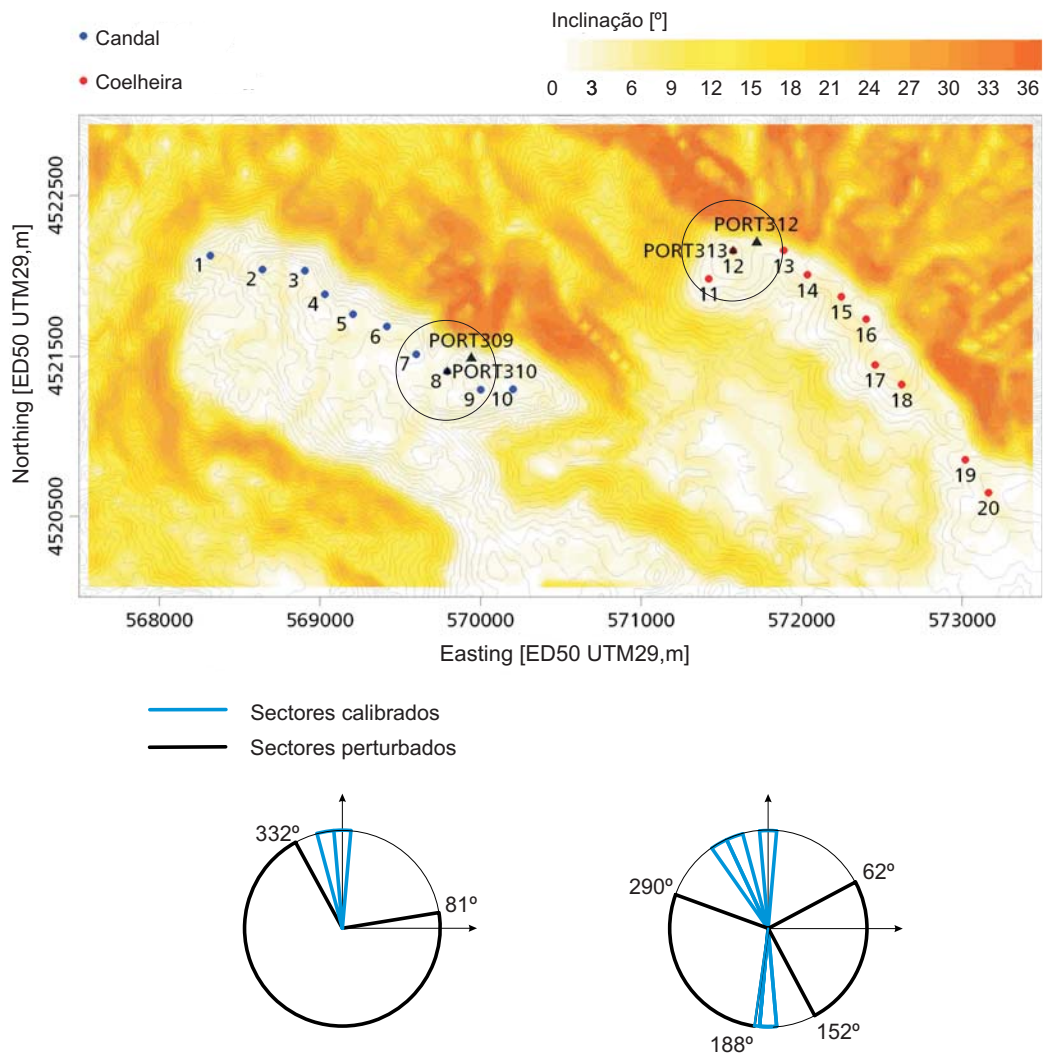


Figura 6.3: Inclinação do terreno de Candal/Coelheira (Cortesia do INEGI)

A cobertura vegetal de Candal/Coelheira é caracterizada pela existência de pequenos arbustos, erva rasteira e algumas pedras, sendo aproximadamente uniforme. Desta forma, pode ser bem representada pela classe 1 de rugosidade, à qual corresponde um rugosidade superficial igual a 0.05 m. [I.B. Troen and P. Erik, ].

## Obstáculos

A existência de obstáculos pode influenciar a velocidade do vento registrada nas estações. Se determinado obstáculo interfere, ou não, com o vento de um local de medida depende da distância entre essa zona e o obstáculo, da altura, comprimento e porosidade do obstáculo, etc.

Em nenhum dos subparques existem obstáculos significativos como edifícios, árvores, etc. que influenciam significativamente o perfil de velocidades. No entanto, devido à presença de outros aerogeradores, é necessária a exclusão de sectores de medição nas estações anemométricas PORT309 e PORT312.

Para ambas as estações, foram adoptados 36 sectores de 10° cada e a sua exclusão foi executada segundo a referência [bib, 2005].

Para a medição da curva de potência do aerogerador 8, as direcções de vento compreendidas nos sectores entre 81° e 332° são excluídas, perfazendo uma disponibilidade de medição em 30% de todos os sectores. O mesmo se aplica ao aerogerador 12 e ventos de azimutes compreendidos entre 62° e 152°, ou entre 188° e 290° serão excluídos, perfazendo uma disponibilidade de medição de 54%.

A determinação dos efeitos de distorção induzidos pela orografia, designada atrás por calibração do local, foi possível através da implementação prévia de duas estações anemométricas, PORT310 e PORT313, nos locais onde se situam os aerogeradores 8 e 12. Apenas dois sectores em onze possíveis, foram calibrados para o aerogerador 8. Para o aerogerador 12, apesar de dezoito sectores disponíveis, apenas se conclui a calibração de cinco.

A diminuta quantidade de sectores calibrados deve-se, essencialmente, ao período relativamente curto e às condições de vento restrictas que se verificaram durante a calibração do local.

Tabela 6.1: Factores de correcção de velocidade - Candal/Coelheira, [J. Matos et al., 2006]

Sectores	Bin	Número de horas			Ratio de Velocidades	Incerteza
		$4 \leq v \leq 16$ m/s	$4 \leq v \leq 8$ m/s	$8 \leq v \leq 16$ m/s		
Sector 1	0°	36.50	26.67	9.00	1.019	0.00018
Sector 36	350°	70.00	58.50	9.50	1.017	0.00045
Sector 1	0°	29.33	20.33	8.17	1.018	0.00003
Sector 19	180°	27.33	18.00	6.22	1.040	0.00019
Sector 20	190°	40.67	24.50	6.46	1.038	0.00062
Sector 34	330°	92.33	84.17	4.72	1.011	0.00010
Sector 35	340°	252.00	226.17	4.76	1.071	0.00003

## Características das estações anemométricas

Ambas as estações anemométricas, PORT309 e PORT312, apresentam uma disposição geométrica dos instrumentos de medição semelhante da figura 5.1. As velocidades do vento são registadas a 30 e 64 metros acima do nível do solo pelos anemómetros de copos, de maneira a ser possível avaliar a sua intensidade e a forma do perfil de velocidades.

Os cataventos encontram-se à cota de 30 metros e 61 metros e o sistema de aquisição de dados é idêntico ao dos anemómetros. Os seus valores são registados em cada 2 segundos ( $0.5Hz$ ) e, posteriormente, gravados sob a forma de médias de 10 minutos com os respectivos parâmetros estatísticos de caracterização de vento, tais como, máximo, mínimo e desvio padrão [J. Matos et al., 2006].

As propriedades físicas e higrométricas do ar também se encontram discriminadas e a sua variação é desprezável entre a torre e o aerogerador, permitindo avaliar a temperatura, pressão e massa volúmica do local com suficiente rigor.

## Características dos aerogeradores

Os aerogeradores do parque de Candal/Coelheira são do modelo E70 e possuem uma geometria distinta dos aerogeradores ordinários por motivos de optimização de alguns componentes tais como a aerodinâmica das pás, possibilitando melhoramentos significativos em termos de rendimento e durabilidade. As suas características técnicas vêm sumariadas na tabela 6.2 [Enercon, 2006]:

Tabela 6.2: Especificações técnicas dos aerogeradores do parque de Candal/Coelheira

ENERCON E70-E4	
Altura do rotor ( $m$ )	64
Diâmetro do rotor ( $m$ )	71
Tipo de aerogerador	Eixo horizontal com controlo de passo
Número de pás	3
Área varrida pelas pás ( $m^2$ )	3959
Potência nominal( $kW$ )	2050
<b>Conceito do gerador</b>	Sem caixa de engrenagens (acoplamento directo rotor/gerador), velocidade variável, controlo activo do ângulo de passo das pás
<b>Conceito de passo</b>	3 sistemas independentes de controlo do passo das pás
Velocidade de arranque ( $m/s$ )	2-3
Velocidade de paragem ( $m/s$ )	25

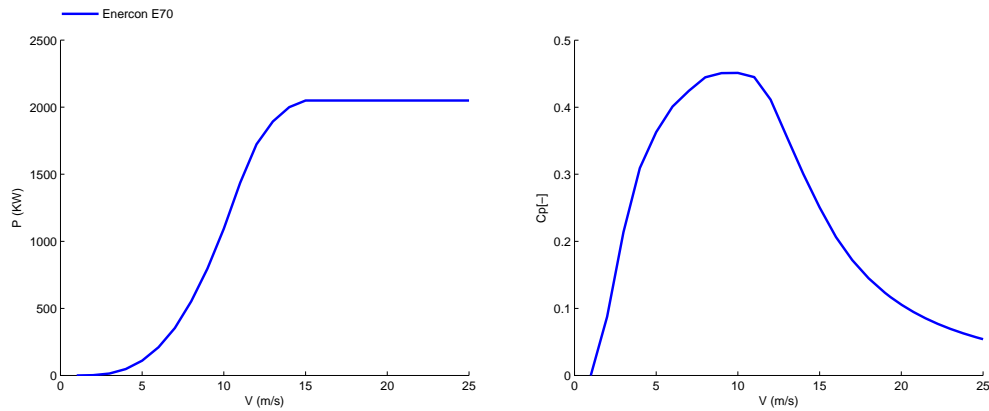


Figura 6.4: Curvas de potência e dos coeficientes de potência dos aerogeradores de Candal/Coelheira

### Parâmetros da rede eléctrica

Os geradores requerem uma interface de forma a adaptarem a energia primária aos parâmetros da rede, utilizando para esse propósito conversores de potência. Essa energia eléctrica, após inserida na rede interna do parque, é redireccionada para a subestação deste através de uma rede de média tensão. Aqui, incluem-se as funções de interligação com a rede eléctrica nacional, medida/contagem, compensação do factor de potência e alimentação dos serviços auxiliares.

A potência do parque de Coelheira é, após tratamento na sua subestação, redireccionada para a subestação do parque de Candal e, posteriormente, para a rede nacional. A potência eléctrica produzida é transmitida sob a forma de corrente trifásica, isto é, as três fases encontram-se desfasadas de  $120^\circ$  e a frequência nominal de ambas as redes é de  $50\text{Hz}$ . As tensões da rede dos parques de Candal e Coelheira são 60 e 20KV, respectivamente.

## 6.2 Parque eólico do Outeiro

O parque eólico encontra-se localizado na Serra do Alvão, uma cadeia montanhosa com 1283 m a Norte de Portugal. Possui 15 aerogeradores Enercon E-70 de 2 MW de potência nominal, perfazendo no total 30 MW de potência instalada.

Os aerogeradores do parque do Outeiro encontram-se referenciados como Enercon E70, contudo, existem algumas particularidades que é necessário salientar. Por opções do fabricante, possuem toda a electrónica e constituição interna da Enercon E66, mas, tendo em vista o seu melhoramento aerodinâmico, foram adaptadas as pás e o rotor da E70.

A geometria da nacelle é idêntica, assim como a disposição dos anemómetros, e para evitar situações dúbias serão referenciados posteriormente como Enercon E66.

O aerogerador 1 é o objecto de estudo e a medição da velocidade não perturbada ao nível do rotor é em tudo semelhante aos aerogeradores anteriores. O conúbio da estação anemométrica de referência, PORT281, com uma segunda estação temporária, PORT283, permitiu determinar os factores de distorção resultantes da orografia do local segundo a norma IEC61400-1.

## Topografia

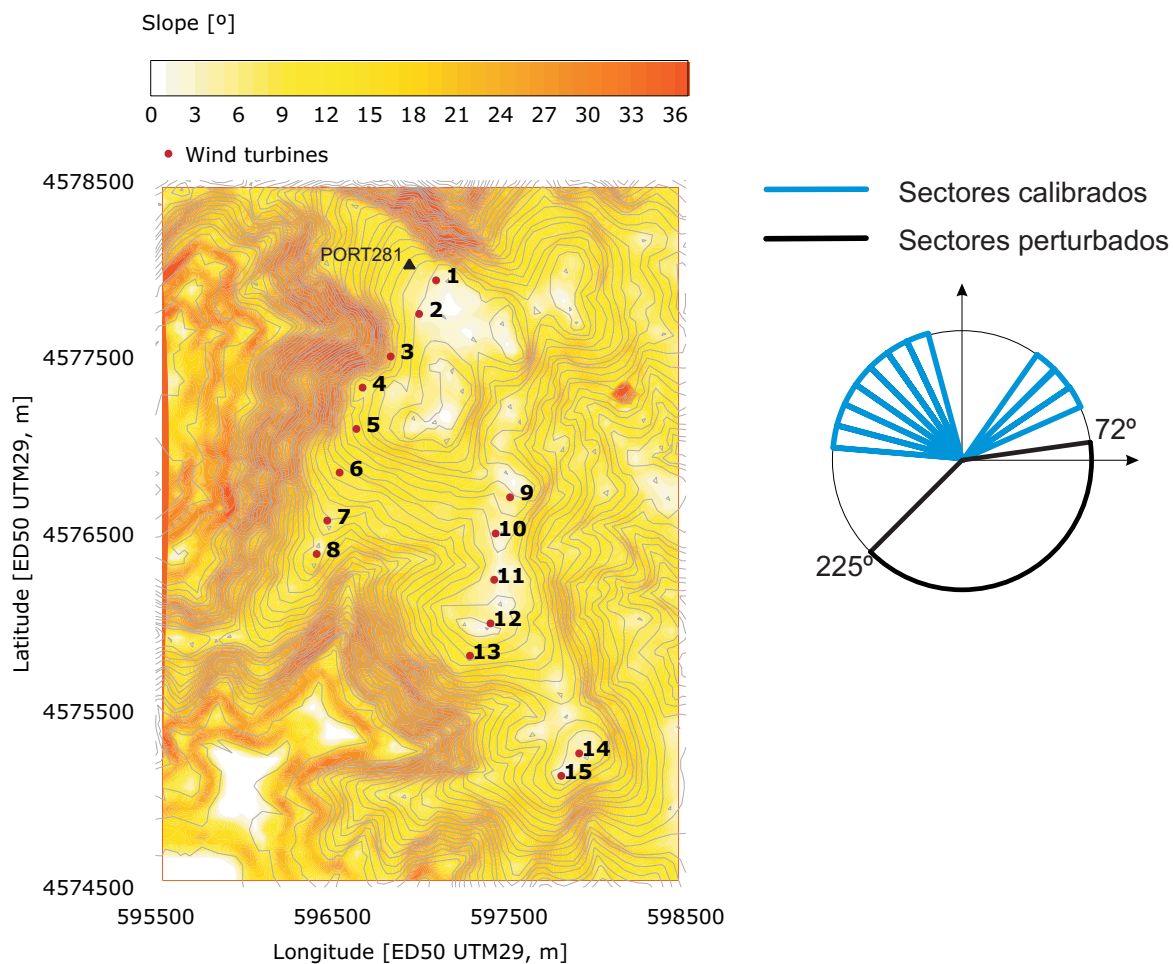


Figura 6.5: Inclinação do terreno de Outeiro (cortesia do INEGI)

A orografia do terreno circundante ao aerogerador em estudo apresenta inclinações significativas a Norte, sendo o restante relativamente plano. Contudo, denota-se da figura 6.5 que o aerogerador 1 se situa num terreno de complexidade elevada.

## Rugosidade

A cobertura do solo pode ser descrita por vegetação de pequena dimensão, podendo ser representada pela mesma classe 1 que o parque eólico de Candal/Coelheira, à qual corresponde uma rugosidade superficial igual a 0.05m [I.B. Troen and P. Erik, ].

## Obstáculos

Não existem obstáculos significativos. Contudo, a proximidade aos aerogeradores implementados na vizinhança obriga à exclusão de sectores de medição, de forma a eliminar dados perturbados pela presença destes.

O procedimento de divisão e exclusão sectorial é idêntico às estações PORT309 e PORT312, e para a medição da curva de potência apenas registos incluídos no intervalo  $[72^\circ; 225^\circ]$  foram considerados perfazendo 58% de disponibilidade do sector [J. Matos et al., 2002].

A determinação dos efeitos de distorção induzidos pela orografia no parque eólico de Outeiro, tornou-se possível através da implementação prévia da estação PORT283. As condições de vento durante o período de 30 de Setembro de 2004 a 3 de Janeiro do ano seguinte permitiram a calibração de 10 sectores, cujos factores se encontram sumarizados na tabela 6.3.

Tabela 6.3: Factores de correcção de velocidade - Outeiro,[J. Matos et al., 2002]

Sectores	Bin	Número de horas			Ratio de Velocidades
		$4 \leq v \leq 16$ m/s	$4 \leq v \leq 8$ m/s	$8 \leq v \leq 16$ m/s	
Sector 5	40°	25.83	11.83	12.17	1.02
Sector 6	50°	31.00	17.17	12.17	1.01
Sector 7	60°	34.50	17.67	15.67	1.01
Sector 29	280°	54.67	27.33	24.33	1.06
Sector 30	290°	71.67	36.33	34.50	1.02
Sector 31	300°	70.67	27.50	42.50	0.99
Sector 32	310°	70.50	19.83	49.17	1.02
Sector 33	320°	61.50	18.00	40.17	1.07
Sector 34	330°	51.17	16.00	32.67	1.07
Sector 35	340°	64.17	12.83	49.67	1.06

## Características das estações anemométricas

A estação de referência possui uma disposição geométrica dos instrumentos de medição distinta das estações anemométricas PORT309 e PORT312. Possui dois anemômetros e um catavento à altura de 63.5 m e 60 m, respectivamente. O sistema de aquisição dos dados SCADA do aerogerador e da estação PORT281 é análogo ao do parque de Candal/Coelheira [J. Matos et al., 2002].

## Características dos aerogeradores

As características técnicas encontram-se sumarizadas na tabela 6.4.

Tabela 6.4: Especificações técnicas dos aerogeradores do parque do Outeiro

ENERCON E66	
Altura do rotor ( $m$ )	65
Diâmetro do rotor ( $m$ )	71
Tipo de aerogerador	Eixo horizontal com controlo de passo
Número de pás	3
Área varrida pelas pás ( $m^2$ )	3959
Potência nominal( $kW$ )	2000
<b>Conceito do gerador</b>	Sem caixa de engrenagens (acoplamento directo rotor/gerador), velocidade variável, controlo activo do ângulo de passo das pás
<b>Conceito de passo</b>	3 sistemas independentes de controlo do passo das pás
Velocidade de arranque (m/s)	2-3
Velocidade de paragem (m/s)	25

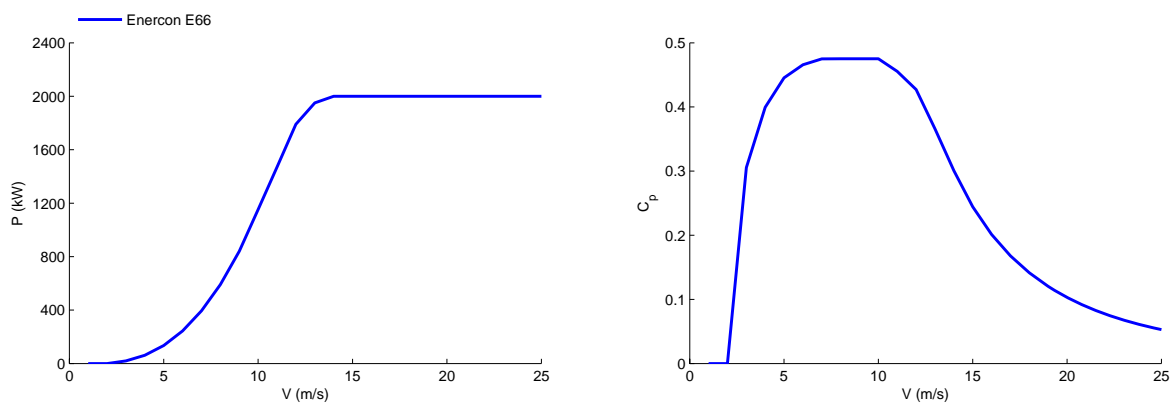


Figura 6.6: Curvas e coeficientes de potência dos aerogeradores do Outeiro

### **Parâmetros da rede eléctrica**

O parque eólico do Outeiro apresenta uma única rede de distribuição de energia interna para a sua subestação antes de ser injectada na rede primária. A tensão encontra-se sob a forma trifásica com uma frequência de  $50Hz$  e uma tensão de  $60KV$ , sendo estes parâmetros idênticos ao parque eólico de Coelheira.

A descrição dos parques eólicos prévios, permitem assim verificar a consistência do uso do anemómetro da *nacelle* para a determinação das curvas de potência.



# Capítulo 7

## Resultados



# Introdução

Neste capítulo é verificada a consistência do uso do anemómetro da *nacelle* para a determinação das curvas de potência. A análise é baseada nos dados de três aerogeradores localizados pertencentes a dois parques eólicos distintos: parque eólico de Candal/Coelheira e do Outeiro.

Tendo como objectivo o estudo da adequação das metodologias anteriormente descritas para a medição das curvas de potência e a produção anual expectável, assim como as condições do escoamento no anemómetro na *nacelle*, neste capítulo foi indagada a relação entre as velocidades e quantificados os efeitos de distorção induzidos pelo rotor.

De igual modo, foi averiguada a sua sensibilidade à orografia específica de cada sector, turbulência e desalinhamento do rotor, de modo a alertar os potenciais futuros utilizadores das limitações desta metodologia.

Por último, denota-se que a utilização desta metodologia é de grande utilidade. Viabiliza a medição das curvas de potência evitando custo extraordinários em estações anemométricas, contribuindo para a eficiência global de construção de um parque eólico.

## 7.1 Parque eólico de Candal/Coelheira

### 7.1.1 Metodologia e directrizes

A determinação da curva de potência depende imperativamente do conhecimento da velocidade não perturbada ao nível do rotor, sendo esta obtida pela velocidade registadas nas estações *PORT309* e *PORT312* e os seus respectivos factores da calibração do local.

A estabelecer de uma metodologia precisa, baseada no uso do anemómetro na *nacelle*, envolve a comparação da velocidade não perturbada, obtida via calibração do local, com os registos da velocidade do anemómetro, provenientes do SCADA, nos mesmos instantes. Dessa comparação determinou-se uma relação entre ambas e aferiu-se a curva de potência resultante desta.

Os sistemas de aquisição de dados SCADA têm como propósito o arquivo de todas as configurações técnicas e dos valores registados pelos elementos que constituem o aerogerador e a rede eléctrica do parque. Estes incluem um histórico, sob a forma de médias de 10 minutos, da velocidade do anemómetro da *nacelle*, velocidade de rotação do rotor, potência gerada e a posição angular da *nacelle* relativamente ao Norte geográfico.

A monitorização de temperaturas, das direcções do cata-vento, entre outros, são realizados directamente pelo fabricante e não existe um histórico disponível. Os máximos e mínimos da velocidade, rotação e potência também se encontra discriminados, assim como o tempo, em cada intervalo de 10 minutos, que o aerogerador se encontrou efectivamente a debitar potência eléctrica para a rede.

O período de estudo para os aerogeradores 8 e 12 do parque de Candal/Coelheira, encontra-se compreendido de 1 de Setembro de 2006 a 31 de Setembro de 2007. Apesar da disponibilidade de sectores não perturbados da estação PORT309 e PORT312, apenas registos de direcção do catavento que estejam contidos nos sectores calibrados permitem avaliar a velocidade não perturbada no rotor dos aerogeradores.

A existência de dados fortuitos, aleatórios e com erros sistemáticos leva à necessidade de apurar quais as principais fontes de erro para se proceder ao seu tratamento estatístico ou à sua eliminação.

Como não foi possível obter nos registos de SCADA o estado de funcionamento do aerogerador, assim como o valor do ângulo de ataque das pás e indicadores de precipitação, recorreu-se à identificação de situações anómalas de funcionamento segundo as seguintes directrizes:

1. Registos em que ocorresse o congelamento dos cataventos ou anemómetros
2. Registos com velocidades inferiores e superiores à do *cut-in* e *cut-out*
3. Períodos de tempo em que ocorresse, voluntariamente, limitação da potência dos aerogeradores ou houvesse indícios de complicações de ordem técnica
4. Valores de tensão 15% desfasados das tensões nominais das redes eléctricas
5. Valores de frequência de rede com um desvio superior a  $0.2Hz$  da frequência nominal
6. Registos em que ao longo dos 10 minutos o aerogerador não estivesse permanentemente a debitar potência eléctrica
7. Ocorrências com coeficientes de performance medidos superiores ao *limite de Betz*

As directrizes adoptadas são seguidamente justificadas por ordem correspondente aos tópicos previamente enunciados.

A primeira directriz deve-se ao facto de condições climáticas adversas que impliquem o congelamento total ou parcial do anemómetro e do catavento, podem ser significativamente

penalizadoras, tanto em termos estruturais como de produção eléctrica. Pode ocorrer inversão do sentido de rotação a baixas velocidades, oscilações anómalas na produção eléctrica, vibrações excessivas e até alteração da forma aerodinâmica das pás em virtude da contracção dos materiais [G. Botta and M. Cavaliere, 1998].

Os indícios de problemas técnicos, relativamente à rede, foram identificados por excedentes da tensão e frequência da rede e pelas curvas de potências dos aerogeradores no anexo A. Transições anómalas para pela carga e limitações de potência foram minuciosamente estudadas e eliminadas, de modo a não influenciar a representatividade dos dados.

O facto de os registos de dados serem sob a forma de médias de 10 minutos exigem a alguma cautela e a eliminação de dados em que o aerogerador não se encontra-se permanente a debitar energia eléctrica é legitimada por:

- Um eventual problema levar o aerogerador a diminuir abruptamente a sua velocidade de rotação, potência e, conseqüentemente, influenciar significativamente a velocidade do anemómetro devido à influenciar destes parâmetros na esteira
- Situações em que nos 10 minutos ocorram mínimos nulos reflectem-se negativamente nas médias não correspondendo a valores verosímeis, podendo deturpar gravemente a relação entre as velocidades

Contudo, as directrizes previamente enunciadas não são condição suficiente para eliminação total de dados corrompidos. É comum a existência de alguns valores medidos extrapolam uma tendência dominante. Estes valores podem ser, de facto, medições erradas, como podem também representar certo fenómeno físico de interesse. Por este motivo, estes valores que fogem à tendência dominante não podem ser descartados sem recorrer a critério consistente para sua eliminação.

Admitindo que os resultados seguem uma distribuição Gaussiana, esta distribuição fornece a probabilidade de que um dado valor medido esteja desviado de um certo valor da média esperada. Assim, se a probabilidade para o desvio de um certo valor medido é menor que  $1/n$ , em que  $n$  é um número de ocorrências, pode-se qualificá-lo para ser eliminado do conjunto de dados. O *critério de Chauvenet* foi adoptado para a eliminação dos dados e especifica que um valor medido pode ser rejeitado se a probabilidade  $m$  de obter o desvio em relação à média é menor que  $1/2n$ .

A aplicação do *critério de Chauvenet* para eliminar valores duvidosos implica primeiramente o cálculo do desvio médio e o desvio padrão do conjunto de dados. O desvio de cada um dos pontos é comparado com o desvio padrão e verificado se ultrapassa valores limite estabelecidos, permitindo a eliminação de pontos duvidosos.

A exclusão de dados corrompidos permitiu nos sectores calibrados da estação PORT309 e PORT312 um número de ocorrências de 246 e 452 horas, respectivamente. O número de ocorrências por sector encontra-se, sob a forma percentual, descrito na figura 7.1 e, à excepção do aerogerador 12, existe uma distribuição de registos uniforme ao longo dos sectores calibrados para os aerogeradores em estudo.

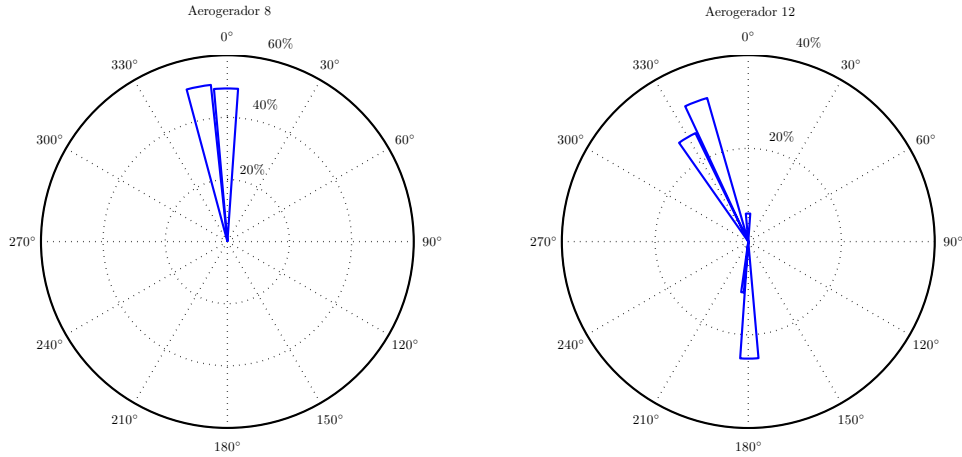


Figura 7.1: Número de ocorrências por sector para os aerogeradores em estudo no parque eólico de Candal/Coelheira

### 7.1.2 Relação entre velocidades

A medição da curva de potência implica a eliminação de dados influenciados que desvirtuem o respectivo procedimento. Na figura 7.2 encontram-se representadas as curvas de potência baseadas na velocidade medida pelo anemómetro na *nacelle*, assim como na velocidade não perturbada determinada pelos factores de correcção.

Uma clara sobrestimativa da curva de potência baseada no anemómetro na *nacelle* é evidenciada na figura 7.2. Para valores de velocidade no anemómetro abaixo dos 5 m/s, estas acompanham-se razoavelmente divergindo à medida que aumenta a velocidade do anemómetro.

Numa primeira análise, conclui-se que é necessário de uma correcção da velocidade do anemómetro de forma a aferir eficazmente a curva de potência. Para tal, analisou-se o cariz da relação entre a velocidade não perturbada obtida pelos factores de correcção do local e a velocidade efectivamente medida pelo anemómetro na *nacelle*. Para ser possível observar tendências, representou-se as velocidades sob a forma de bins, que simplesmente são a média aritmética dos valores da velocidade do anemómetro, em cada intervalo de velocidade de 0.5 m/s, e das velocidades não perturbadas correspondentes.

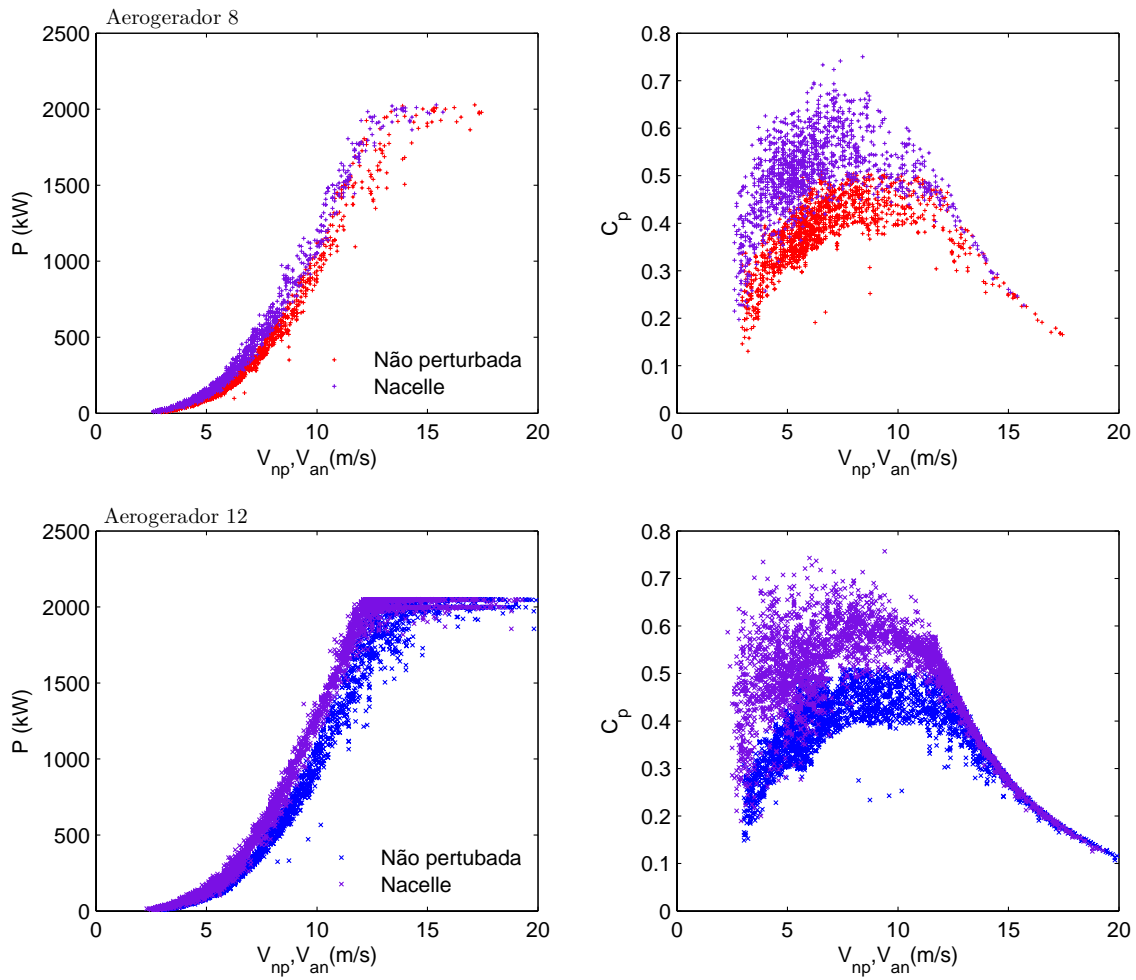


Figura 7.2: Curvas de potência - Candal/Coelheira

A figura 7.3 permite observar a relação entre a velocidade não perturbada à altura do rotor e a velocidade no anemómetro da *nacelle*. O aerogerador 8 possui um número de ocorrências reduzido a velocidades elevadas, resultado das condições de vento durante o período considerado e do número de sectores restrito. Quanto ao aerogerador 12, este revela um maior número de ocorrências a velocidades elevadas, podendo-se analisar o seu comportamento fora do domínio da estatística de pequena amostragem.

A primeira ilação da figura 7.3 é que para ambos os aerogeradores a velocidade medida pelo anemómetro é inferior à velocidade não perturbada determinada pelos factores de calibração. Este aspecto permite justificar o cariz das curvas de potência mostradas anteriormente, figura 7.2, visto que esse défice resulta na translação da curva de potência para a esquerda. Outro aspecto relevante é que a evolução desse défice é distinta para ambos e ao longo do seu domínio, justificando o aumento gradual da distinção entre as

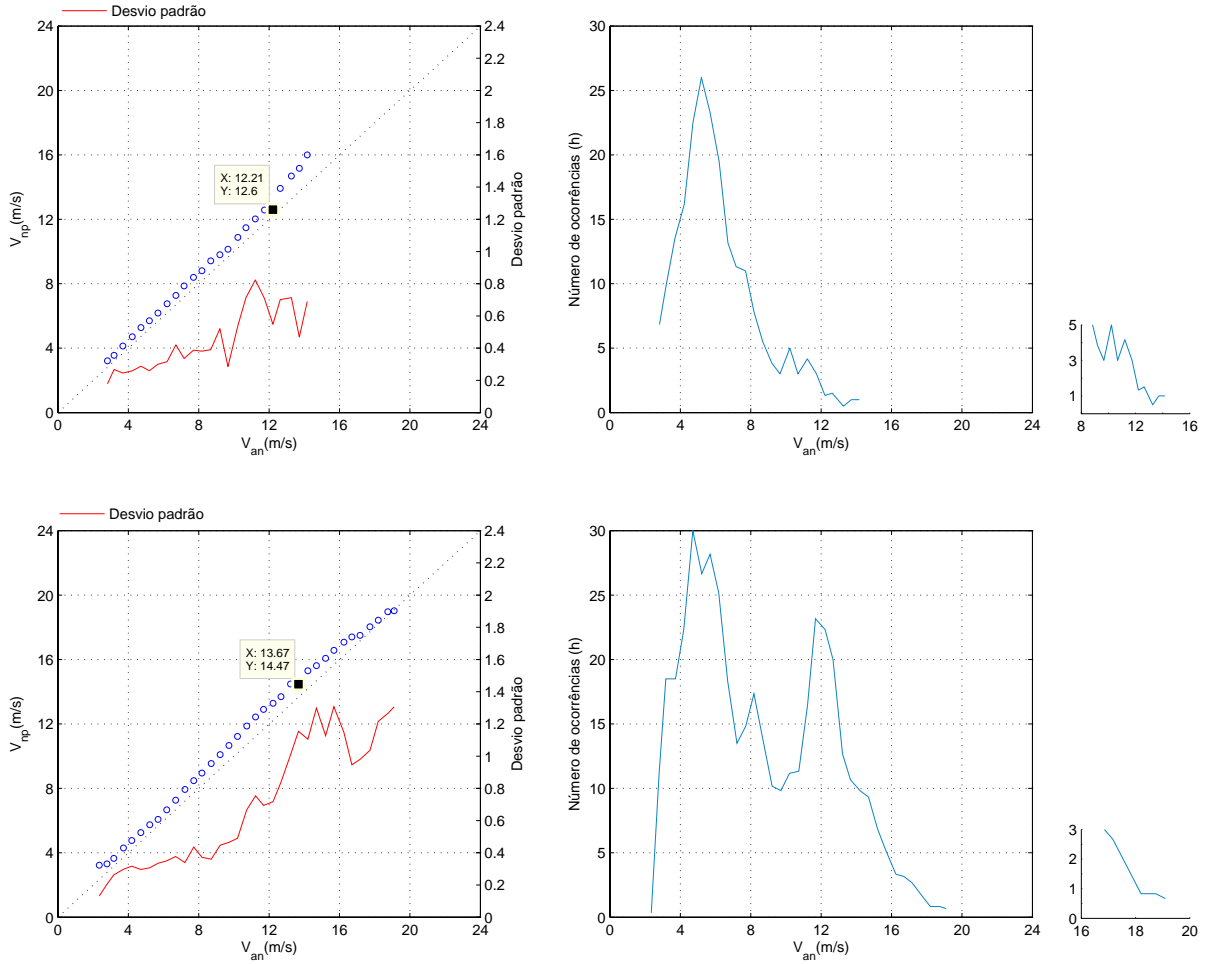


Figura 7.3: Relação entre velocidades - Candal/Coelheira

curvas de potência baseadas nas duas velocidades.

O facto de ocorrer um défice de velocidades a jusante do rotor revela concordância com o teoricamente esperado, visto que, em virtude da passagem do escoamento nas pás o seu decréscimo energético implica uma diminuição da velocidade.

Para velocidades em que ocorre passagem para plena carga, denota-se que os bins assumem um comportamento distinto dos restantes. Este facto é evidenciado pelos dois pontos assinalados no gráfico 7.3 e revelam uma aceleração abrupta do escoamento. Porém, o seu comportamento não ocorre no mesmo instante, podendo ser justificado relativamente ao aerogerador 8, pelo número de ocorrências diminuto.

A variabilidade do escoamento experimentado pelo anemómetro de cada aerogerador é evidenciada pela primeira e segunda derivada de ajustamentos polinomiais pelos seus bins. De forma a tornar simples a sua interpretação, estudou-se o comportamento da



velocidade do anemómetro em função da velocidade não perturbada medida, encontrando-se representada no gráfico 7.4.

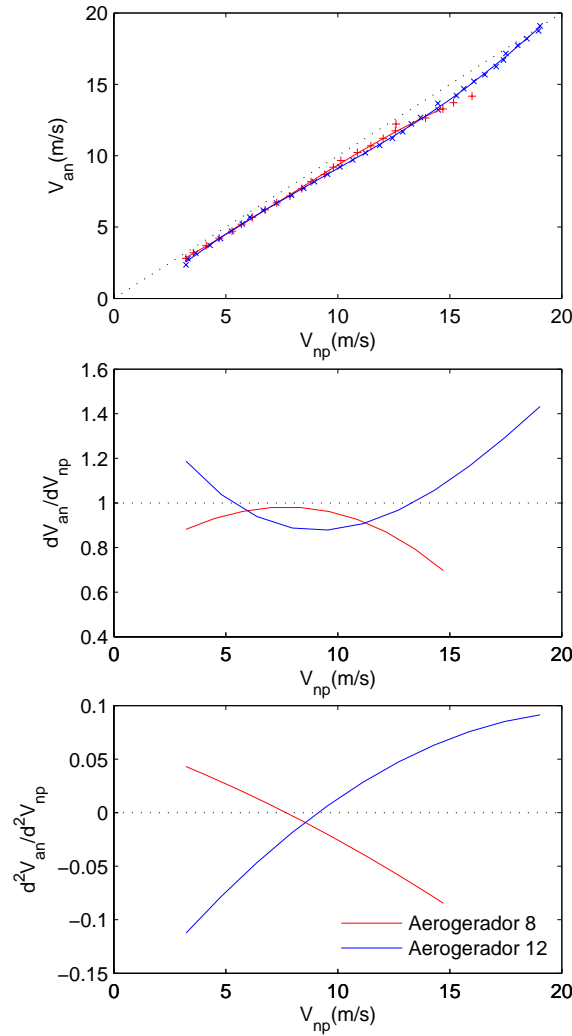


Figura 7.4: Comportamento da velocidade do escoamento na zona de esteira para os aerogeradores de Candal/Coelheira

A razão entre a taxa de variação da velocidade experimentada pelo anemómetro pela taxa de variação da velocidade não perturbada indica a evolução do défice de velocidades com o aumento da velocidade do anemómetros. Para valores inferiores ou superiores a unidade, o défice de velocidades tende a aumentar ou diminuir, respectivamente.

A evolução da primeira derivada é paradoxal entre os aerogeradores, ocorrendo situações de aceleração na esteira no aerogerador 12 para velocidades inferiores e superiores a 5 e 13 m/s, respectivamente. Esse aceleração resulta numa diminuição do défice de velocidades que, com o aumento da velocidade medida pelo anemómetro, tende para a nulidade.

### 7.1.3 Função transferência

As figuras 7.3 sugerem que é possível estabelecer uma função matemática entre ambas as velocidades que avalie e quantifique a influência do rotor no escoamento experimentado pelo anemómetro localizada na *nacelle*; porém, a sua natureza demonstra que essa função não é linear.

Primeiramente, é necessário definir a gama de velocidades em que efectivamente é necessário atingir o máximo de resolução da curva de potência. A gama de velocidades de relevância para este estudo é delimitada do cut-in até à passagem para plena carga. Factores de forma e escala da distribuição de Weibull típicos de um parque eólico, traduzem-se numa maior concentração de ventos a baixas velocidades, que aliados à inexactidão das curvas de potência na mesma gama de velocidades, penalizarão fortemente a estimativa de produção.

Outro facto de igual relevância é que, independentemente da natureza da variação do défices de velocidades, para velocidades de vento em que o aerogerador se encontra a plena carga, deixa de ser relevante em termos produção anual expectável devido a se manter na potência nominal constante.

No ajustamento de uma função os dados são divididos em duas componentes, a determinística e a variável, geralmente designada por erro. Estes representam variações aleatórias dos dados e assume-se que sejam susceptíveis a tratamento estatístico. Um ajustamento matemático, intrinsecamente admite que estes sigam uma distribuição gaussiana com média nula e variância constante e quanto mais o ajustamento respeitar esta condição, maior será a sua fiabilidade.

Com o intuito de verificar qual o método mais indicado para a medição das curvas de potência, adoptaram-se três metodologias. O procedimento da norma IEC61400, [bib, 2008], isto é, um ratio entre bins, ajustamentos matemáticos pelos bins assim como pelos dados brutos.

A adequabilidade do grau do ajustamento matemático a um determinado conjunto de dados requer alguma subjectividade e de forma a contornar esta adversidade, realizaram-se paralelamente quatro tipos de regressões polinomiais pelos bins. Dois ajustamentos de 4º e 5º ordem simples obtido pelo método dos erros mínimos quadráticos e, paralelamente, duas funções polinomiais de 4º grau obtidas pela metodologia do erro quadrático mínimo, pesado com o número de ocorrências e o inverso da variância. Bins com desvio padrão elevado intrinsecamente acarretam más repetibilidades e, previsivelmente, um ajustamento tendencioso a bins bem definidos implicará melhores resultados .

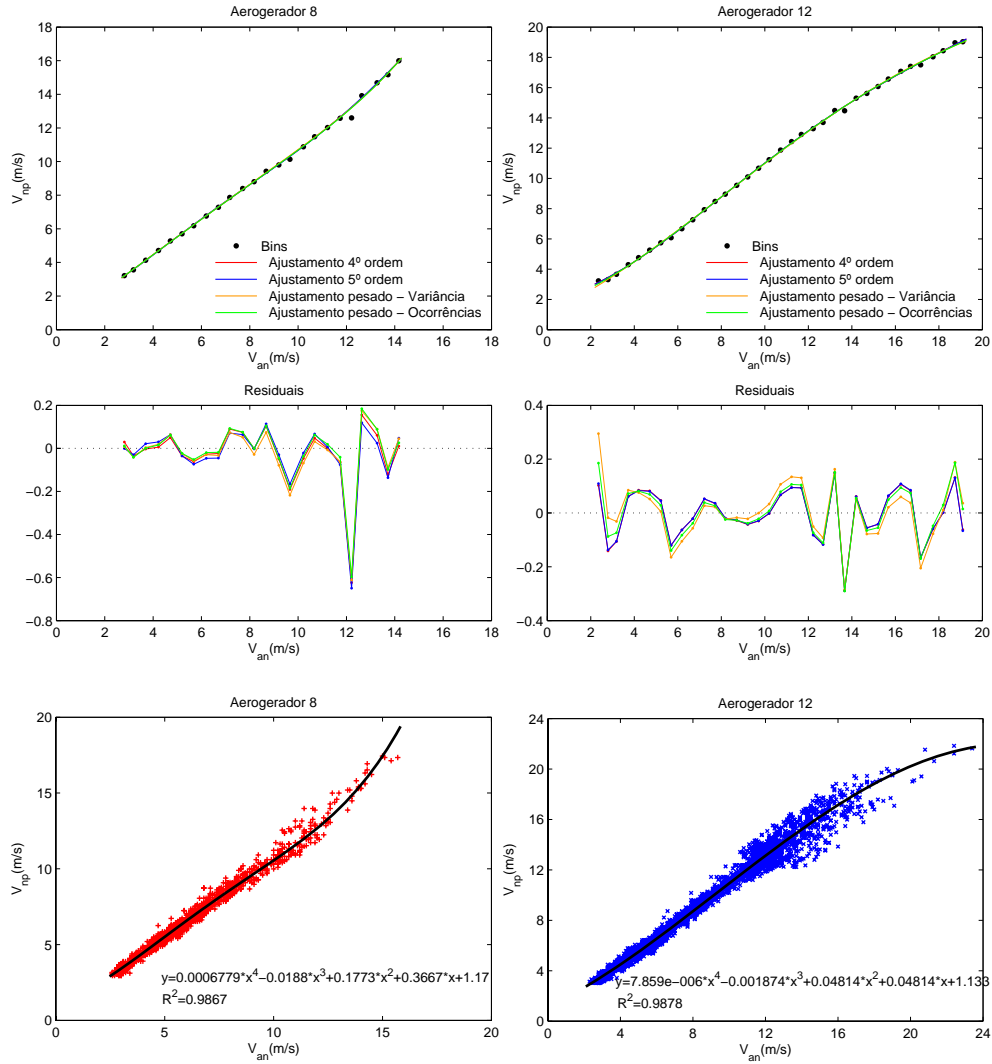


Figura 7.5: Funções transferência

A figura 7.1.3 mostra os ajustamentos polinomiais realizados para ambos os aerogeradores assim como os seus residuais.

### 7.1.4 Curvas de potência

As curva de potência de um aerogerador regularmente encontram-se referenciadas à massa volúmica de  $1.225 \text{ Kg/m}^3$  e a sua comparação com a determinada no local, para aerogeradores de controlo de passo, exige a normalização da velocidade não perturbada no rotor, [Akins, 1978].

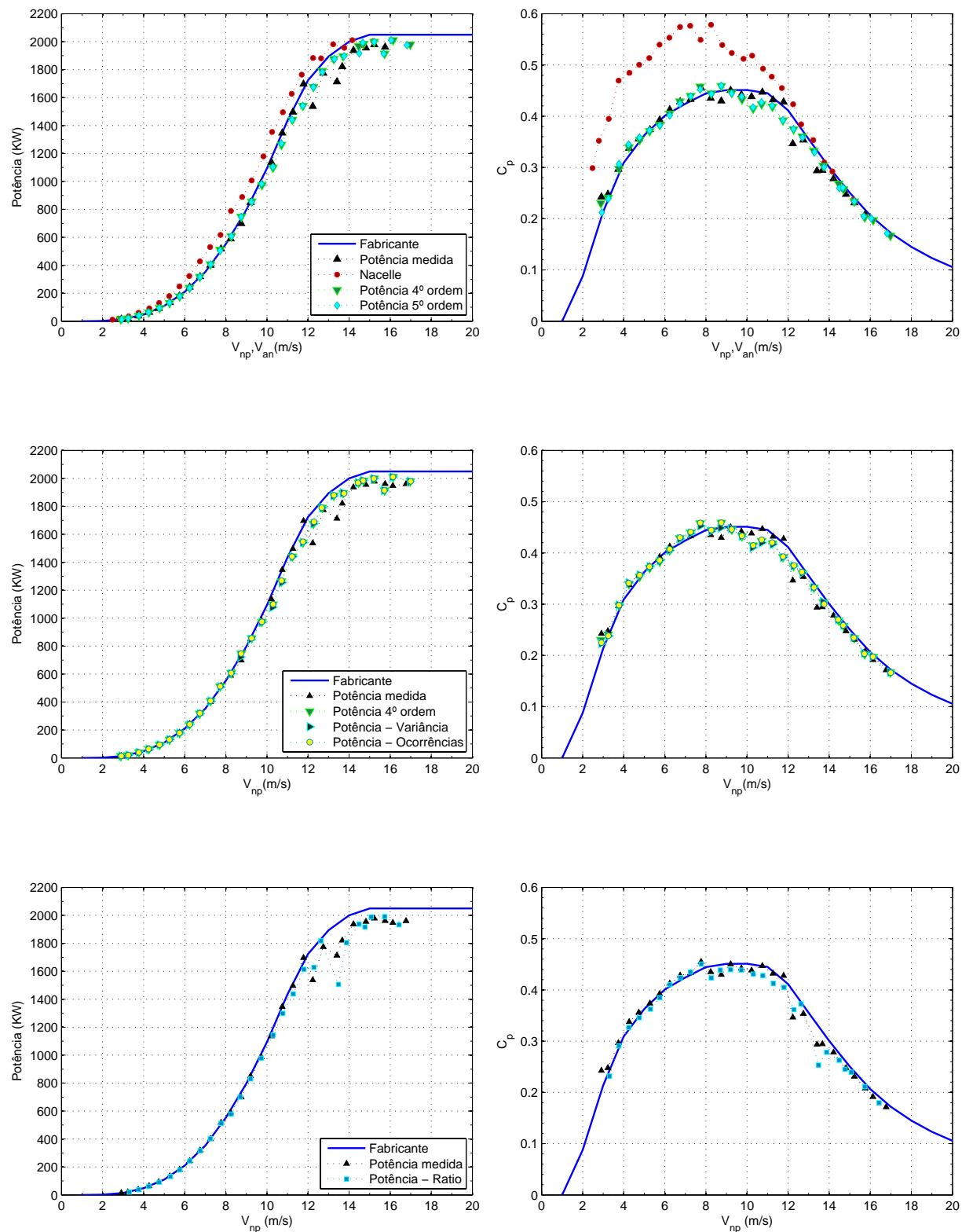


Figura 7.6: Curvas de potência para o aerogerador 8

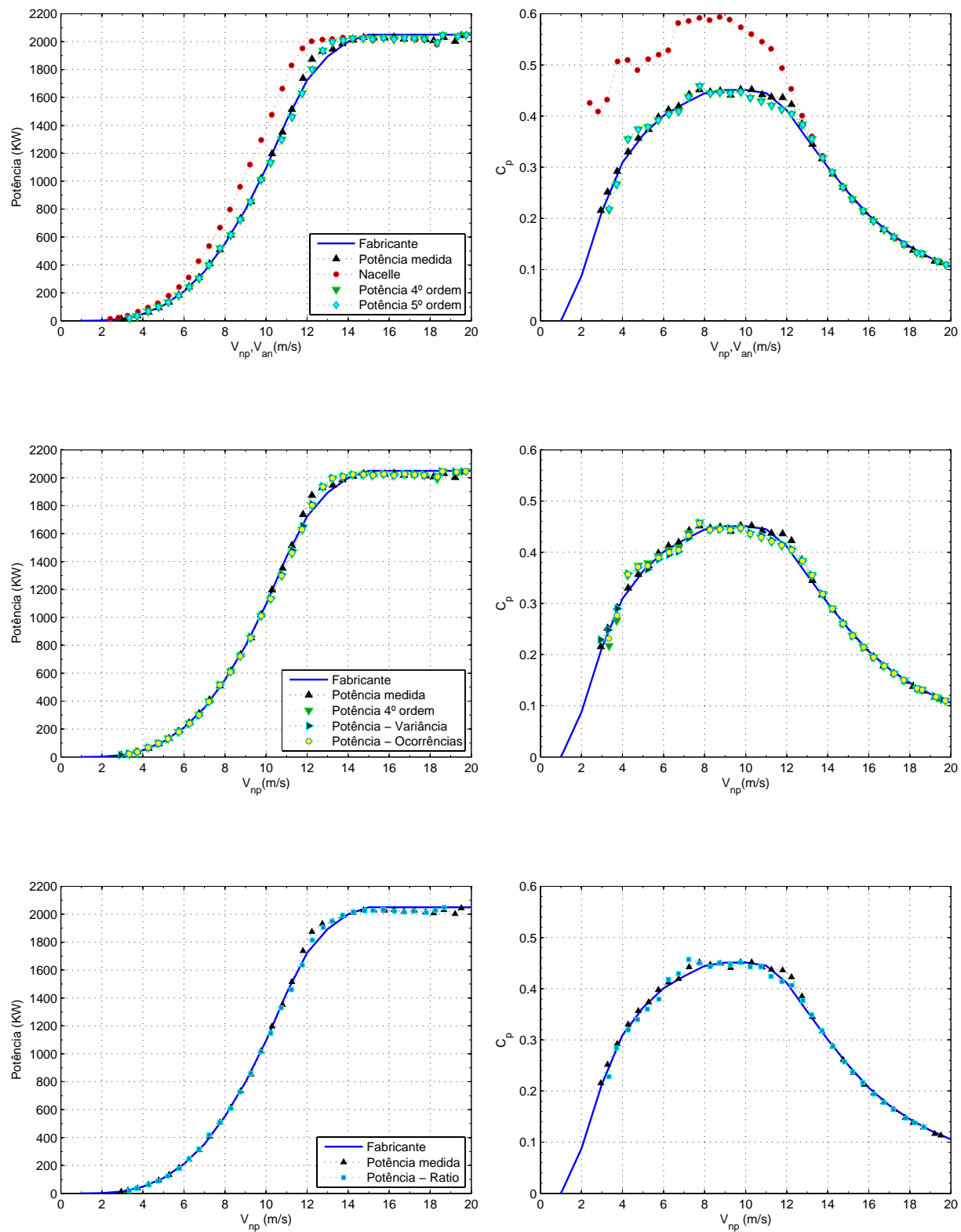


Figura 7.7: Curvas de potência para o aerogerador 12

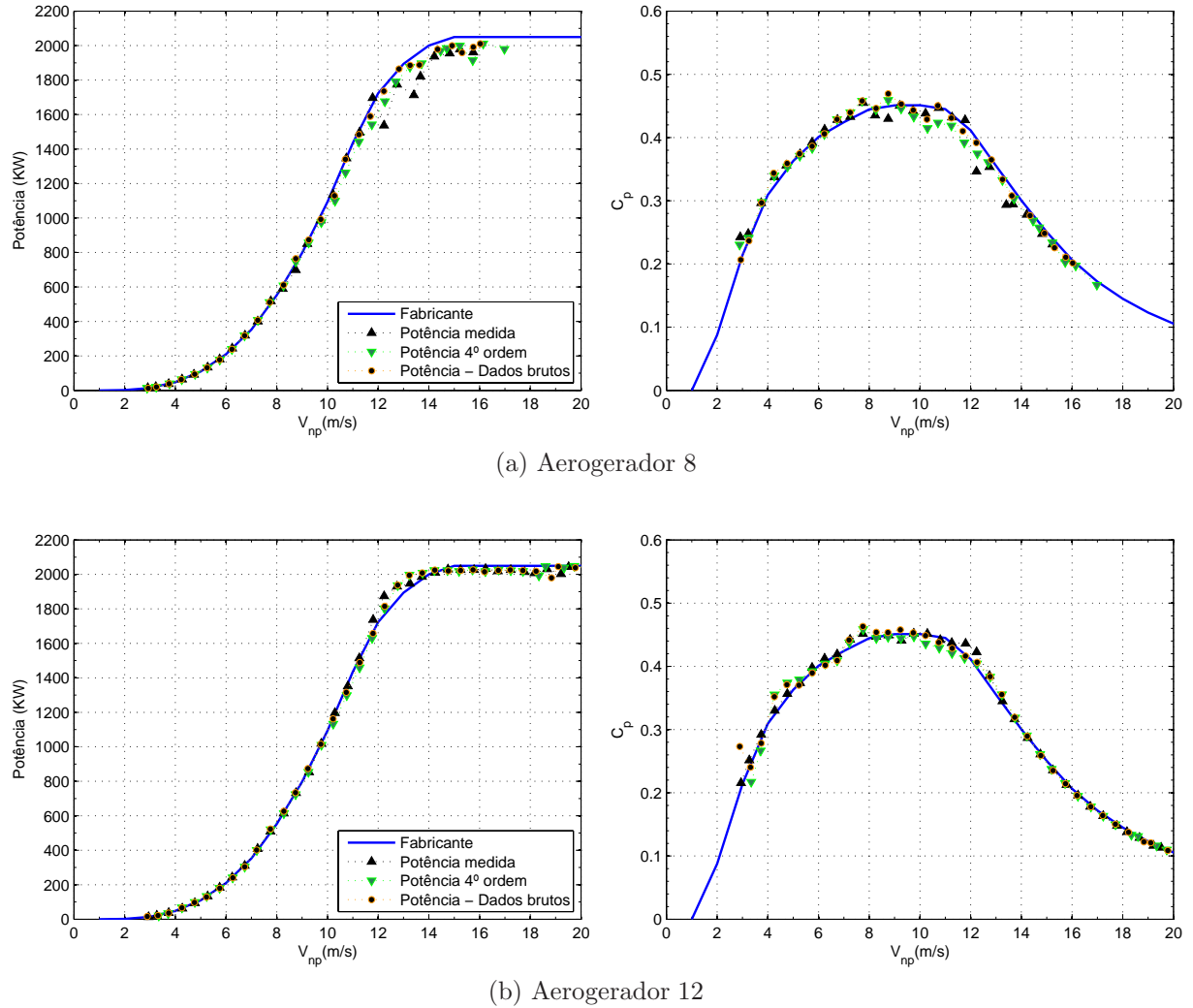


Figura 7.8: Curvas de potência baseadas em ajustamentos polinomiais pelo dados brutos para ambos os aerogeradores

## Aerogenerator 8

Para ser possível a sua comparação, encontram-se identificadas as curvas de potência referidas pelo fabricante e a medida pelos factores de calibração. Ambas revelam consonância começando a divergir significativamente a partir dos 12 m/s devido ao número de ocorrências reduzido.

A curva de potência obtida alternativamente pela razão de bins a par do ajustamento pelos dados brutos, apresentam-se muito próximas da curva medida, sendo este facto notório nas curvas de performance devido à importância da velocidade vir elevada ao cubo.

## Aerogerador 12

O comportamento da curva de potência baseada na velocidade do anemómetro é em tudo semelhante à do aerogerador 8, à excepção do coeficiente de potência tender a ser constante na gama de velocidades de 4 a 6 m/s devido à potência aumentar à mesma taxa do cubo da velocidade. No aerogerador 8 denota-se um comportamento ligeiramente distinto na mesma gama de velocidades, no entanto, não tão acentuado, indicando que nessa gama de velocidades o escoamento experimentado pelo anemómetro apresenta uma variabilidade significativa.

As curvas medidas revelam que o uso dos factores de calibração do local para a medição da curva de potência leva a resultados muito próximos aos da curva de potência do fabricante, e demonstram que ambos os aerogeradores possuem ligeiramente melhor desempenho do que indicado nesta, sendo este facto claro na passagem para plena carga, fundamentando as garantias oferecidas pelos fabricantes face às exigências de produção eléctrica dos parques eólicos.

Tal como esperado, na gama de velocidades em que ocorre a transição para plena carga denota-se uma melhoria da curva baseada em ratios relativamente aos ajustamentos, devido a ser mais eficaz onde os ajustamentos revelam maiores residuais.

Outro aspecto de igual relevância é a concordância entre a curva de potência medida e a obtida via anemómetro na *nacelle*. A razão inerente a essa concordância reside no grau dos ajustamentos realizados ao contrário da referência [B.Smith et al., 2002] que se revela errónea.

Nesta, os autores admitiram uma relação entre velocidade não perturbada e a do anemómetro linear em que o declive é inferior à unidade, indicando um aumento da magnitude do défice de velocidades constante na zona de esteira do aerogerador.

Na mesma referência pode ser constatado que um ajustamento linear resulta em algumas discrepâncias entre as curvas de potência efectivamente medidas e as obtidas pela velocidade corrigida via anemómetro na *nacelle*. Efectivamente, as curvas de potência interceptam-se a 10 m/s e, devido a este facto, não se apresentam erros sistemáticos penalizadores em termos de produção anual expectável devido às diferenças das curvas de potência antes e após dessa velocidade se cancelarem mutuamente quando admitida uma distribuição de ventos de Rayleigh.

### 7.1.5 Produção anual expectável

A medição das curvas de potência permite quantificar a sobre/subestimativa destas relativamente à curva de potência de referência, isto é, a do fabricante.

O desconhecimento das expressões analíticas que as caracterizam implicam a utilização de métodos de integração numérica de forma a determinar o valor aproximado do integral que permite determinar a produção anual expectável, AEP. A metodologia adoptada foi a regra trapezoidal, [Tony Burton and David Sharpe, 2001], e é definida por:

$$AEP = \int_0^{\infty} P(V)f(V)dV$$

$$AEP = N_h \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left( \frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \quad (7.1)$$

em que  $F(V)$  representa a frequência cumulativa de vento para o bin  $i$ . As características do vento no periodo anual com início em Agosto foram determinadas no *software* WAsP através dos dados das estações anemométricas de referência dos aerogeradores em causa, encontrando-se sumarizadas na figura 7.10.

O princípio de funcionamento do *software* WAsP consiste em estimar as condições num local específico através da generalização de séries temporais de longo termo num determinado local de referência. A sua precisão depende essencialmente da estabilidade da camada atmosférica e da influência da orografia para manter o escoamento ajunto ao solo [J. Anthony and G. Niels, 1996]. Implementa, na generalidade, a metodologia preconizada no Atlas Europeu de Vento e tem por base duas premissas:

1. o fluxo de potência identificado na série de velocidades é igual ao obtido através da função de Weibull ajustada
2. a frequência de ocorrências superiores à velocidade média é igual tanto na série de velocidades como para a função de Weibull ajustada

Estas duas premissas traduzem-se pelo seguinte sistema de equações:

$$\begin{cases} \frac{2F_{Pot}}{\rho} = & A^3 \Gamma \left( 1 + \frac{3}{k} \right) \\ Freq_{>V} = & e^{-\left(\frac{V}{A}\right)^k} \end{cases}$$

A primeira premissa força o conteúdo energético dado pela função ajuste de Weibull a ser igual ao extraído da série de dados, tentando desta forma não desvirtuar o potencial eólico global constante na informação original. A segunda premissa foca a distribuição das velocidades num patamar superior de intensidade do vento. Nesta, respeita-se o papel desempenhado pelas velocidades situadas numa gama mais elevada, uma vez que tendencialmente a sua contribuição para o potencial eólico observado é elevada.



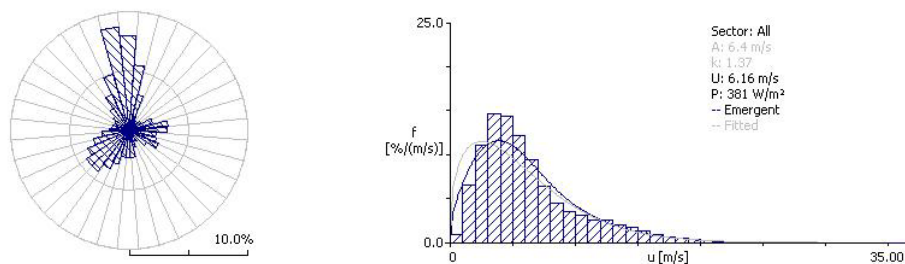


Figura 7.9: Rosa e histograma de ventos - Port309

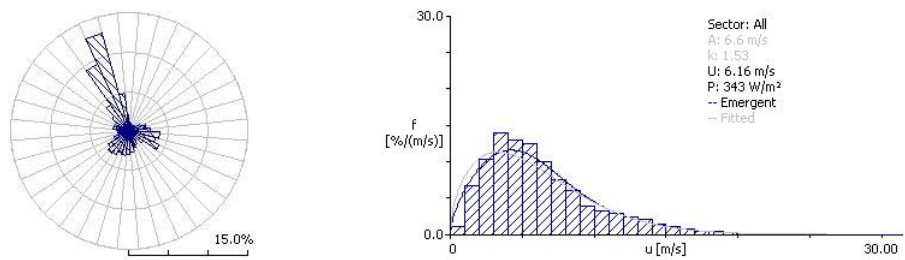


Figura 7.10: Rosa e histograma de ventos - Port312

Assim sendo, a previsão dos parâmetros caracterizadores da distribuição de Weidbull através dos dados das estações de referência dos aerogeradores são rigorosos devido à sua proximidade.

As curvas de potência encontram-se definidas até à velocidade de entrada na zona de plena carga, no entanto, para velocidades superiores a 20 m/s não foi possível completar a sua caracterização. De forma a comparar as diferentes curvas, assumiu-se a potência nominal para velocidades superiores a 20 m/s em ambos os aerogeradores.

Tabela 7.1: Produção anual expectável para cada curva de potência

Curva de Potência	Aerogerador 8			Aerogerador 12		
	AEP(GWh)	$\delta h_{pc}$	$\frac{AEP-AEP_{Fab}}{AEP_{Fab}} (\%)$	AEP(GWh)	$\delta h_{pc}$	$\frac{AEP-AEP_{Fab}}{AEP_{Fab}} (\%)$
Fabricante	3750.2	0	0	3763.2	0	0
Medida	3645.8	-51	-2.8	3766.7	2	0.1
<i>Nacelle</i>	4185.0	212	11.6	4464.3	342	18.6
4º Ordem	3645.4	-51	-2.8	3724.8	-19	-1.0
5º Ordem	3643.8	-52	-2.8	3724.2	-19	-1.0
Variância	3637.1	-55	-3.0	3726.3	-18	-1.0
Ocorrências	3651.4	-48	-2.6	3719.5	-21	-1.2
Ratios	3585.9	-80	-4.4	3734.4	-14	-0.8
Dados brutos	3702.5	-23	-1.3	3766.2	-2	-0.1

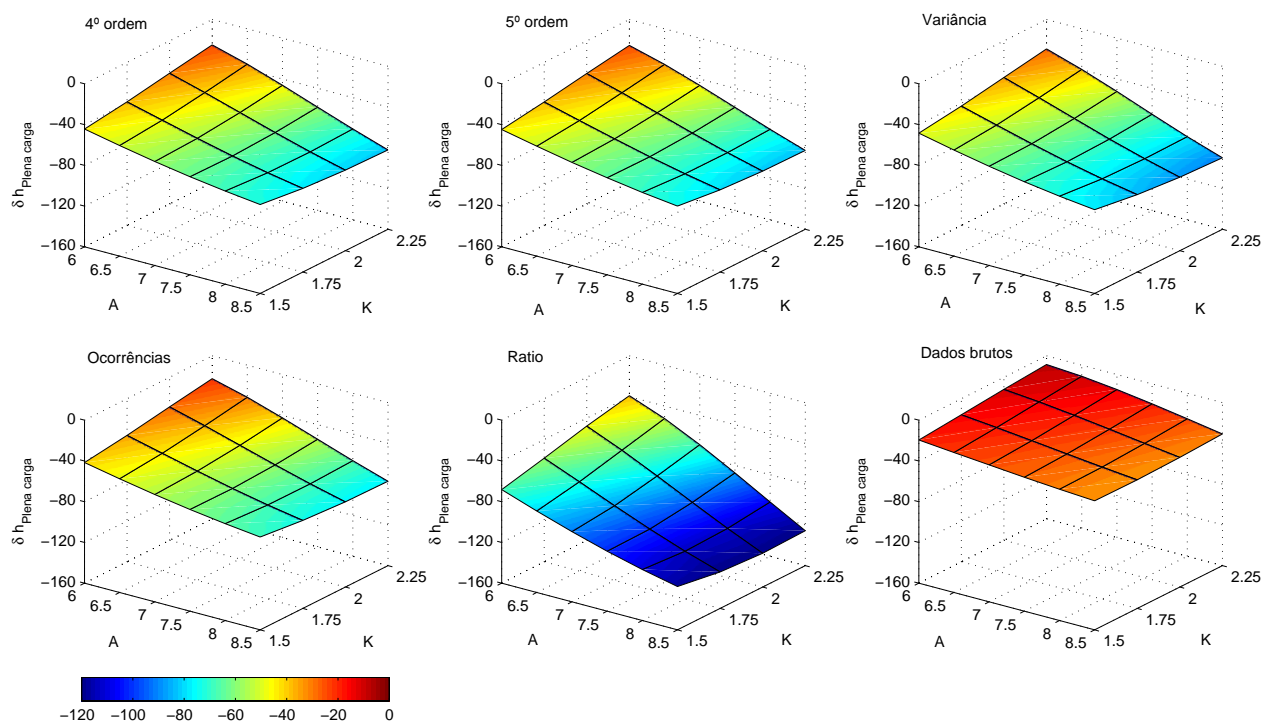


Figura 7.11: Sensibilidade ao factor de escala e de forma - Candal

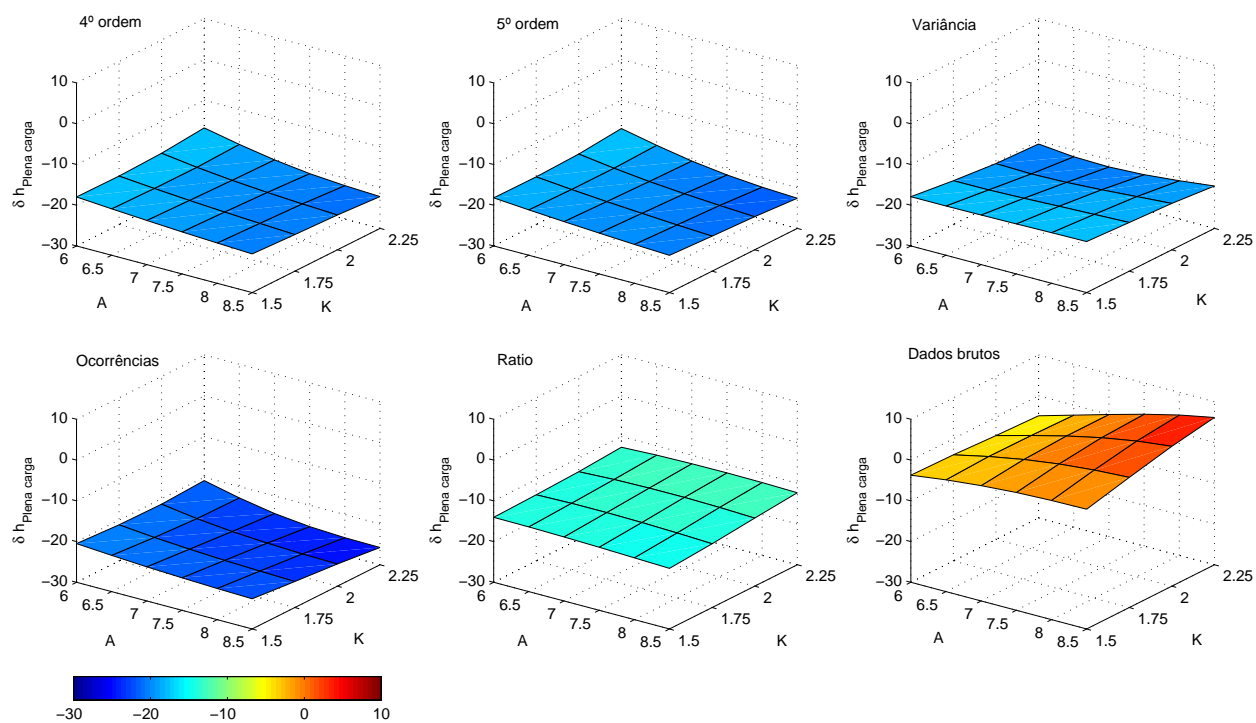


Figura 7.12: Sensibilidade ao factor de escala e de forma - Coelheira

A diferença de produção anual expectável de cada curva de potência comparativamente à do fabricante em função do factor de forma e escala da distribuição de Weibull, encontra-se apresentada sob a forma de horas equivalentes a plena carga, sendo evidenciados os máximos e mínimos pela escalas colorimétricas.

As curvas de potência obtidas para o aerogerador 8 possuem um maior máximo devido à carência de dados na zona de passagem para plena carga. O aerogerador 12 revela-se praticamente insensível aos parâmetros característicos da distribuição de Weibull, possuindo um máximo de défice cinco vezes inferior ao aerogerador 8.

De igual modo, verifica-se que um ajustamento pelos dados brutos para ambos leva a menores sensibilidades aos parâmetros de Weibull.

### 7.1.6 Influência da orografia

Previamente, assumiu-se que uma função transferência global sobrepondo os efeitos de todos os sectores, é condição suficiente para a determinação precisa da curva de potência.

A relação entre ambas as velocidades e a própria natureza do escoamento poderá, porventura, variar sectorialmente, e a escolha minuciosa deste será fundamental para o sucesso da metodologia de medição da curva de potência via anemómetro na *nacelle*.

Com o intuito de apurar a validade da função transferência global para diferentes sectores, analisou-se primeiramente a relação entre a velocidade não perturbada e a medida no anemómetro da *nacelle* para cada sector calibrado, assim como as suas derivadas.

Numa primeira análise verifica-se que o défice entre as velocidades, assim como a sua evolução ao longo do seu domínio, não é igual entre os sectores.

Relativamente ao aerogerador 8, os sectores calibrados referem-se a ocorrências de ventos provenientes de Norte e o seu domínio de análise comum é confinado até velocidades não perturbadas de 10 m/s, devido ao número de ocorrências restrito.

Constata-se que o défice de velocidades é semelhante para ambos os sectores, todavia, a sua evolução ao longo do domínio é distinta, figuras 7.13 e 7.14. Para o sector 36, devido à taxa de variação de velocidade do anemómetro ser no máximo semelhante à unidade, este tende ao longo do seu domínio a aumentar o défice de velocidades.

O aerogerador 12 permite uma análise mais alargada, não só devido ao número de ocorrências quantitativamente superior, mas à diversidade de ocorrências provenientes de sectores com orografias distintas. A análise é compreendida até 14 m/s.

A primeira ilação é que ocorrências provenientes da direcção Sul, sectores 19 e 20, apresentam a maior magnitude de défices e o seu comportamento é muito similar, tendendo para o aceleração após os 10 m/s.

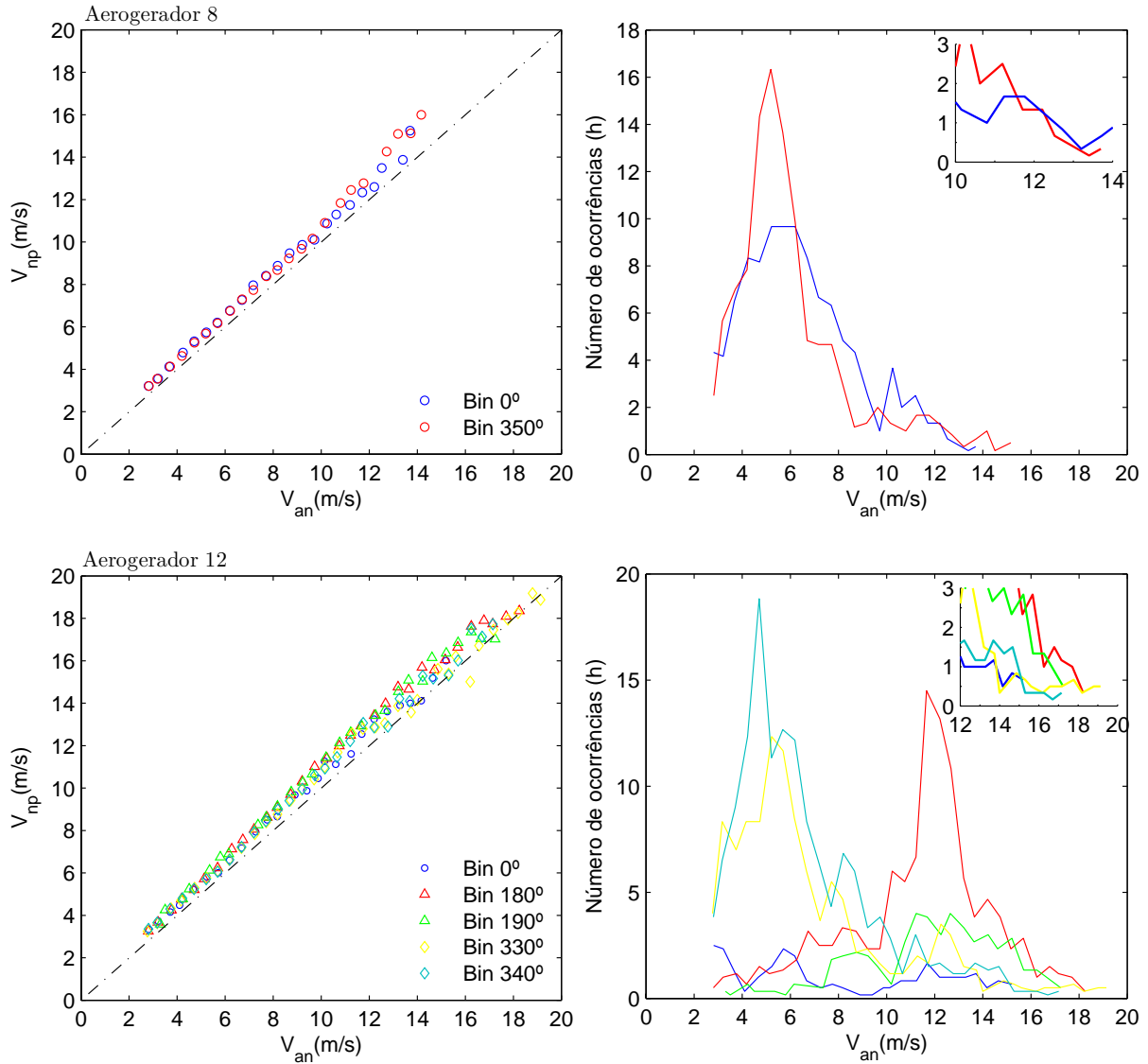


Figura 7.13: Relação entre velocidades por sector - Candal/Coelheira

Contrariamente, para direcções de vento proveniente de Norte, sectores 1, 34, 35, esse défice é de menor magnitude. Os sectores 1 e 34, apresentam uma tendência semelhante à dos sectores previamente descritos com a particularidade do sector 1 a baixas velocidades. Este facto, indica que sectores onde a orografia é propícia a um perfil de velocidades mais uniforme o défice de velocidades tende a ser menor.

O sector 35 revela um comportamento peculiar ocorrendo um aceleração após a gama de velocidade de 8 a 10 m/s, primeiro e de modo mais intenso que os sectores contíguos.

A complexidade introduzida pelo rotor é elevada e deve dominar a que o escoamento

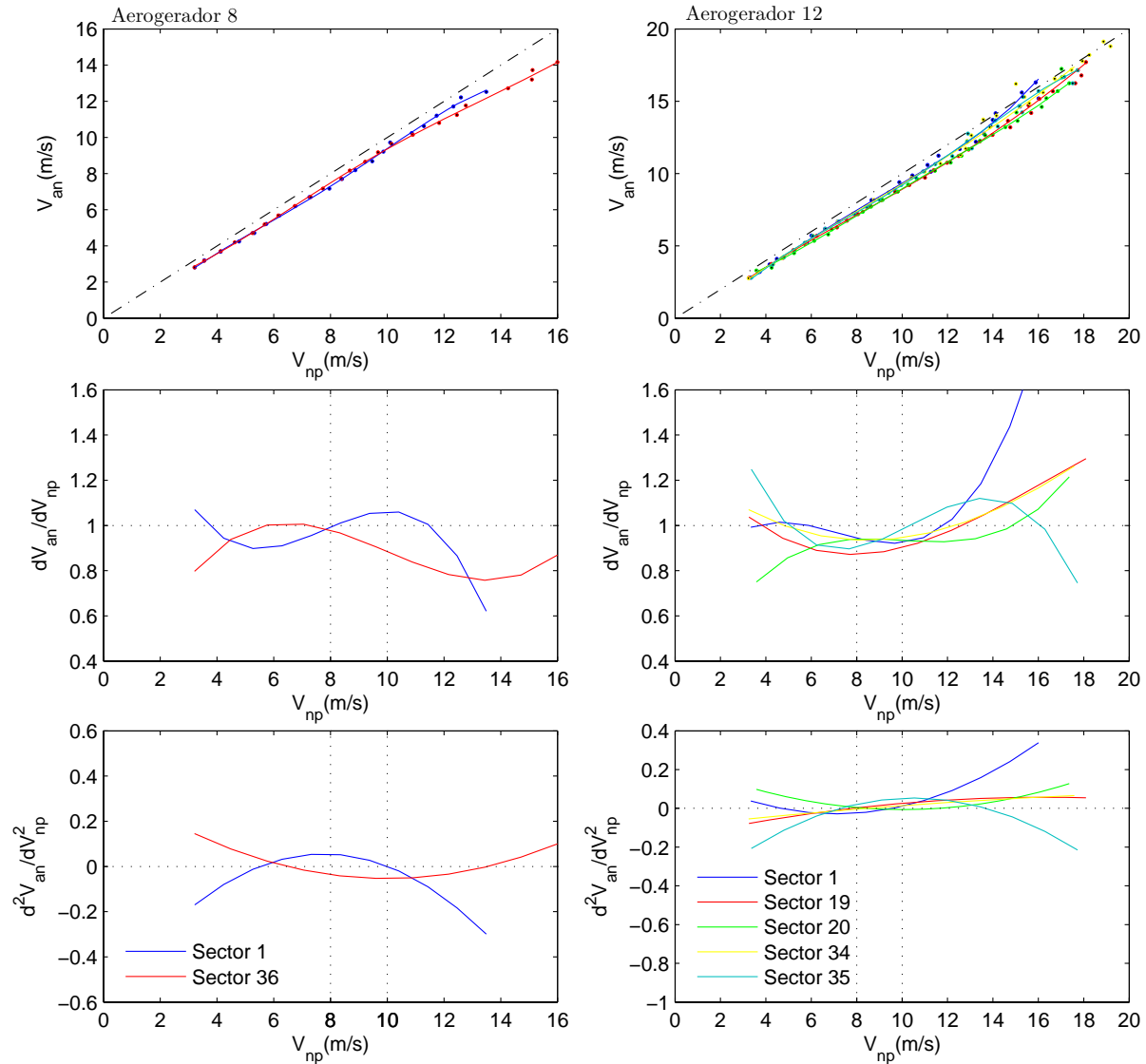


Figura 7.14: Comportamento da velocidade do escoamento por sector

já possui a montante. Porém, alguns trabalhos realizados mostram uma sensibilidade da velocidade medida pelo anemómetro à turbulência e componentes verticais do escoamento a montante, [Albers et al., 2007].

A determinação de componentes verticais no escoamento relativamente a escoamentos provenientes de Norte, realizou-se com o recurso ao *software* WAsP Engineering e a sua magnitude encontra-se representada na figura 7.15.

A figura 7.15 demonstra a inexistência de componentes verticais significativas junto aos aerogeradores em estudo. Os resultados obtidos pelo *software* WAsP são susceptíveis a erros devido a basearem-se em premissas que nem sempre se verificam na prática. Contudo,

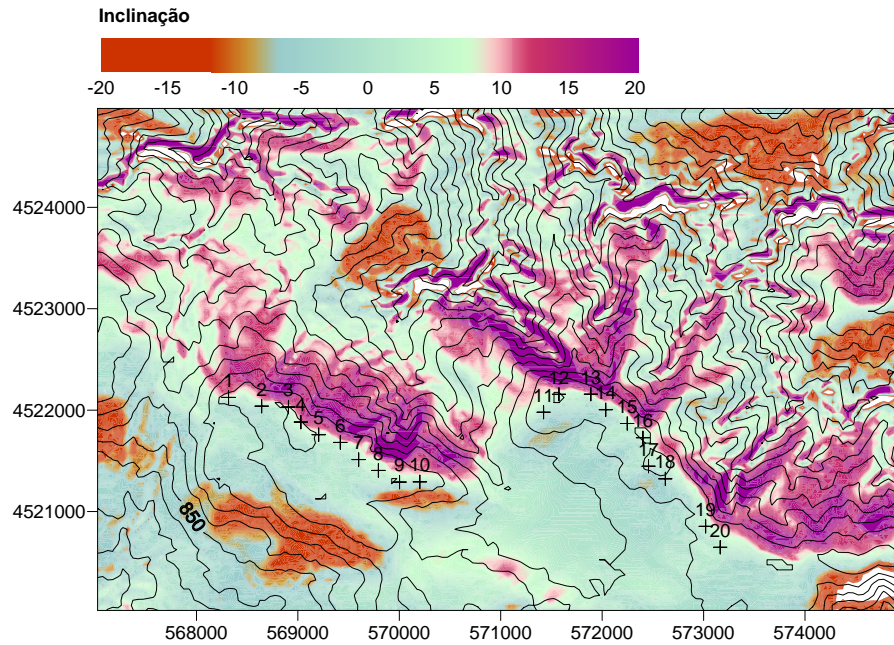


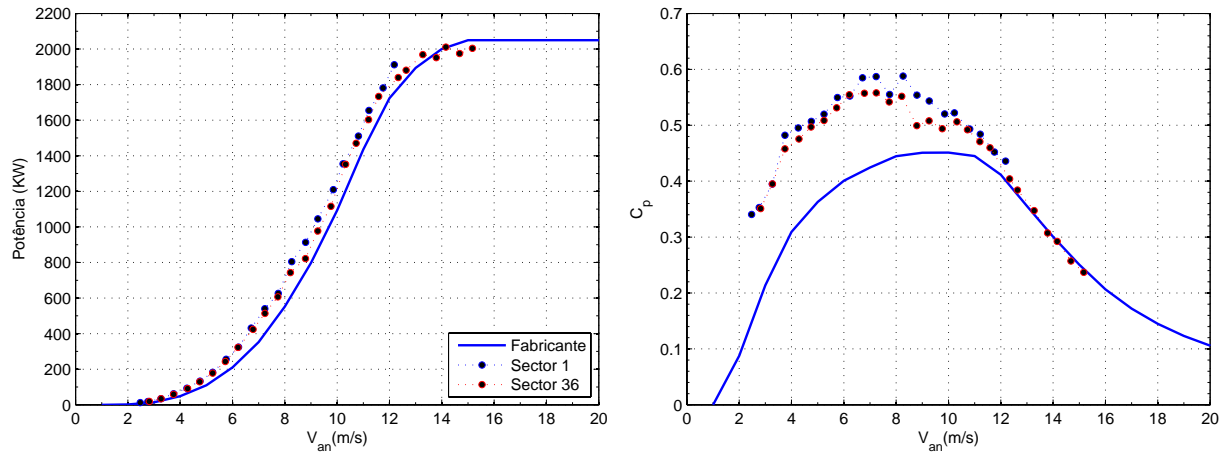
Figura 7.15: Componentes verticais do escoamento no parque eólico de Candal/Coelheira

a medição de componentes verticais foi realizada no aerogerador 12 e comprovada a sua inexistência, [Iko Jervell, 2008].

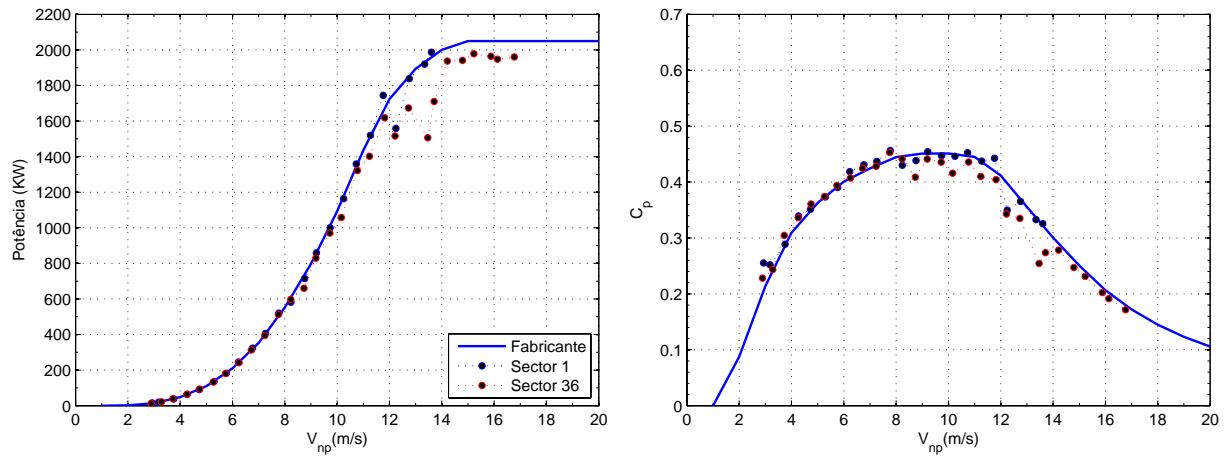
Posto isto, o comportamento particular do sector 35 pode ser justificado por alguma especificidade orográfica do sector que repercute maiores complexidades do escoamento na zona de esteira.

A análise do comportamento entre as velocidades evidencia a sua variabilidade entre sectores. De forma a analisar qual a sua penalização em termos de energia anual expectável, determinou-se:

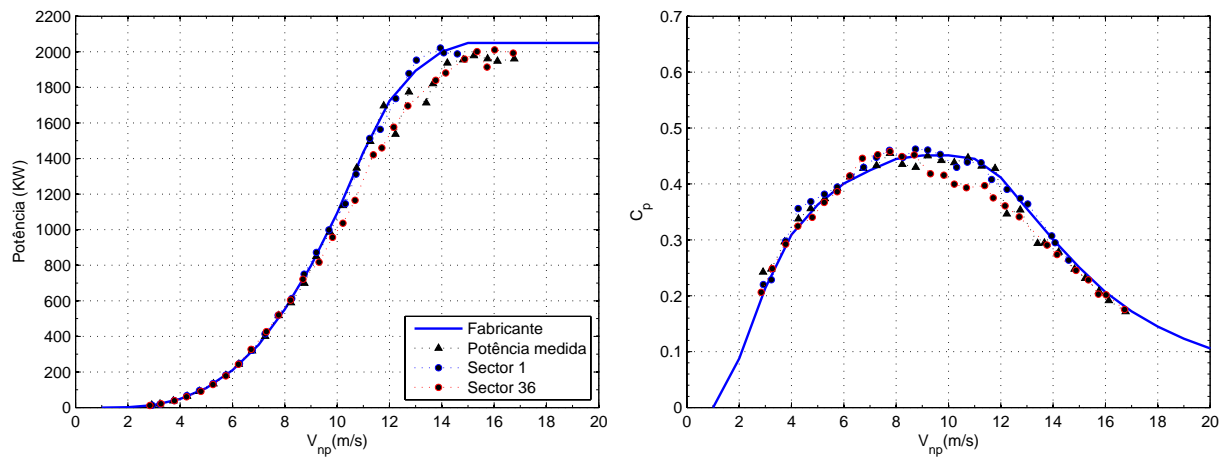
1. Uma função transferência e a curva de potência via anemómetro da *nacelle* respectiva para cada sector calibrado. Os ajustamentos de 4º ordem revelam-se suficientes e encontram-se discriminados no anexo B.
2. Qual a melhora na curva de potência quando utilizadas as funções transferência individuais por sector, em vez da função transferência global, isto é, o ajustamento polinomial sem distinção de ocorrências por sector.
3. Para o aerogerador 12, duas curvas de potência com o recurso à função transferência global baseadas unicamente em ocorrências de sectores com orografias distintas. Para tal, agrupou-se todas as ocorrências dos sectores contidos entre as direcções Norte e Sul.



(a) Curvas de potência baseadas na velocidade do anemômetro na *nacelle*



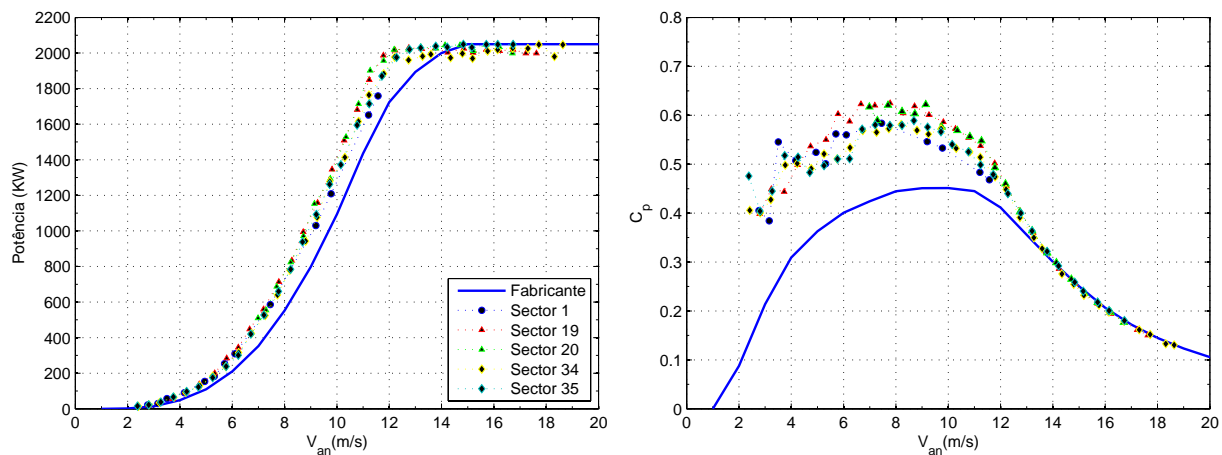
(b) Curvas de potência medidas



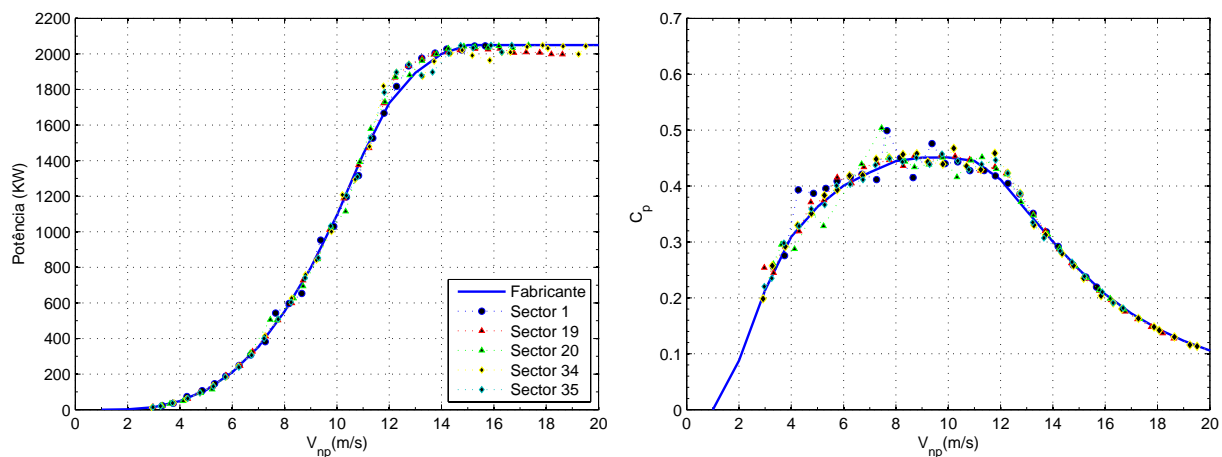
(c) Curvas de potência obtidas pela função transferência

Figura 7.16: Curvas de potência sectoriais - Candal

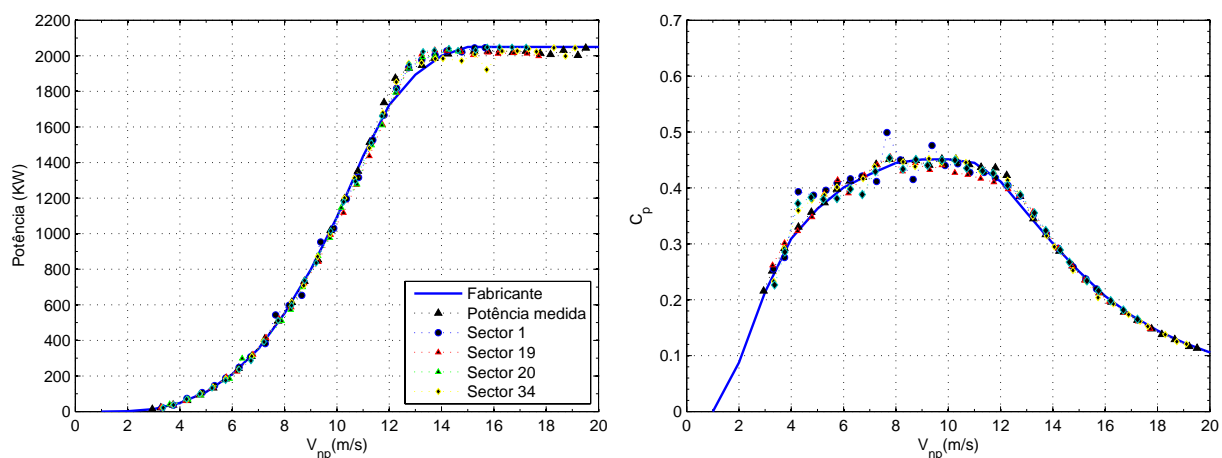




(a) Curvas de potência baseadas na velocidade do anemômetro da *nacelle*



(b) Curvas de potência medidas



(c) Curvas de potência obtidas pela função transferência

Figura 7.17: Curvas de potência sectoriais - Coelheira



Ambas as curvas baseadas na velocidade medida pelo anemómetro na *nacelle* sobrestimam a do fabricante e é evidente uma sensibilidade em função do sector. É de realçar que a diferença entre as curvas de potência ao longo da velocidade registada no anemómetro na *nacelle* é tendencialmente nula em sectores contíguos.

Todavia, sectores que possuam orografias distintas diferem significativamente entre si, sendo evidente nas zonas de  $C_p$  máximos. Este facto subscreve a ideia que as condições do escoamento na zona de esteira depende do efeito da orografia circundante no escoamento a montante, e não unicamente dos efeitos do rotor.

A tabela 7.2 representa a AEP baseada nas curvas de potência para cada sector, medidas e obtidas pela função transferência. O sector 36 do aerogerador 8 não possui as suas curvas definidas até a transição para plena carga, daí comparar-se relativamente à curva do fabricante apenas na gama de velocidade de 3 a 12 m/s.

Tabela 7.2: Estimativa de produção anual das curvas de potência sectoriais

Sectores	Aerogerador 8				Aerogerador 12			
	Medida	Função transferência			Medida	Função transferência		
	AEP (GWh)	$\delta h_{P_c}$	AEP (GWh)	$\delta h_{P_c}$	AEP (GWh)	$\delta h_{P_c}$	AEP (GWh)	$\delta h_{P_c}$
Sector 1	2405.0	2	2418.4	-4	3818.2	27	3762.8	0
Sector 19	-	-	-	-	3771.5	4	3707,0	-27
Sector 20	-	-	-	-	-	-	-	-
Sector 34	-	-	-	-	3774.7	6	3753,4	-5
Sector 35	-	-	-	-	3755.2	-4	3743,5	-10
Sector 36	2312.8	-49	2279.1	-66	-	-	-	-

As figuras 7.18 e 7.19 demonstram a sensibilidade destas ao factor de forma e de escala típicos da distribuição de Weibull. Tal como esperado, a diferença em termos de horas a plena carga é elevada para o sector 36. Contudo, a figura 7.18 demonstra que essa diferença em função de  $A$  e  $K$  apresenta um máximo semelhante e diminuto para sectores que possuam um número de ocorrências apreciável.

As curvas de potência por sector previamente obtidas evidenciam a necessidade de determinar uma função transferência por sector para rigor na curva de potência. A curva de potência determinada com base nos ajustamentos por sector encontra-se na figura 7.20.

As curvas de potência obtidas via função transferência global e por sectores revelam concordância. O défice de produção anual das curvas de potência relativamente à do fabricante é de 41 e 8 horas equivalentes a plena carga para os parâmetros de escala e de forma caracterizadores do período em estudo, concluindo-se que a metodologia que produz resultados mais próximos da curva medida é um ajustamento polinomial pelos dados brutos.

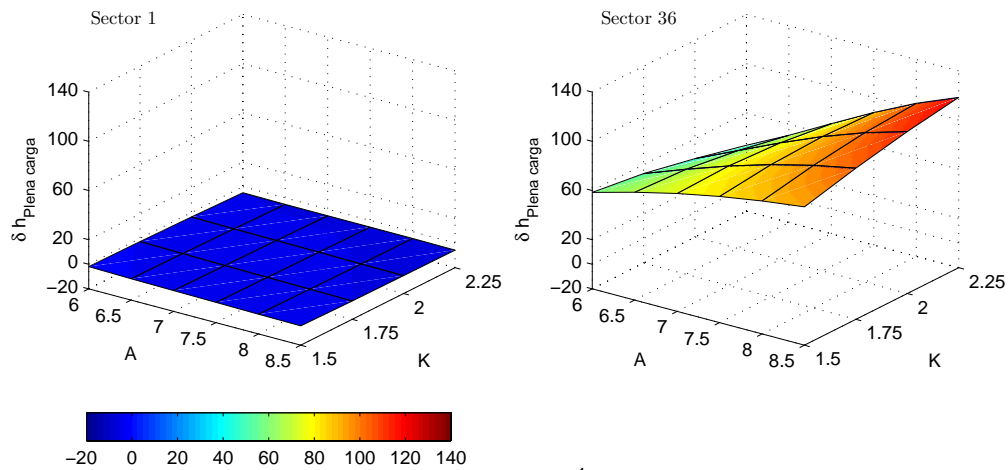


Figura 7.18: Sensibilidade ao factor de escala e de forma por sector - Candal

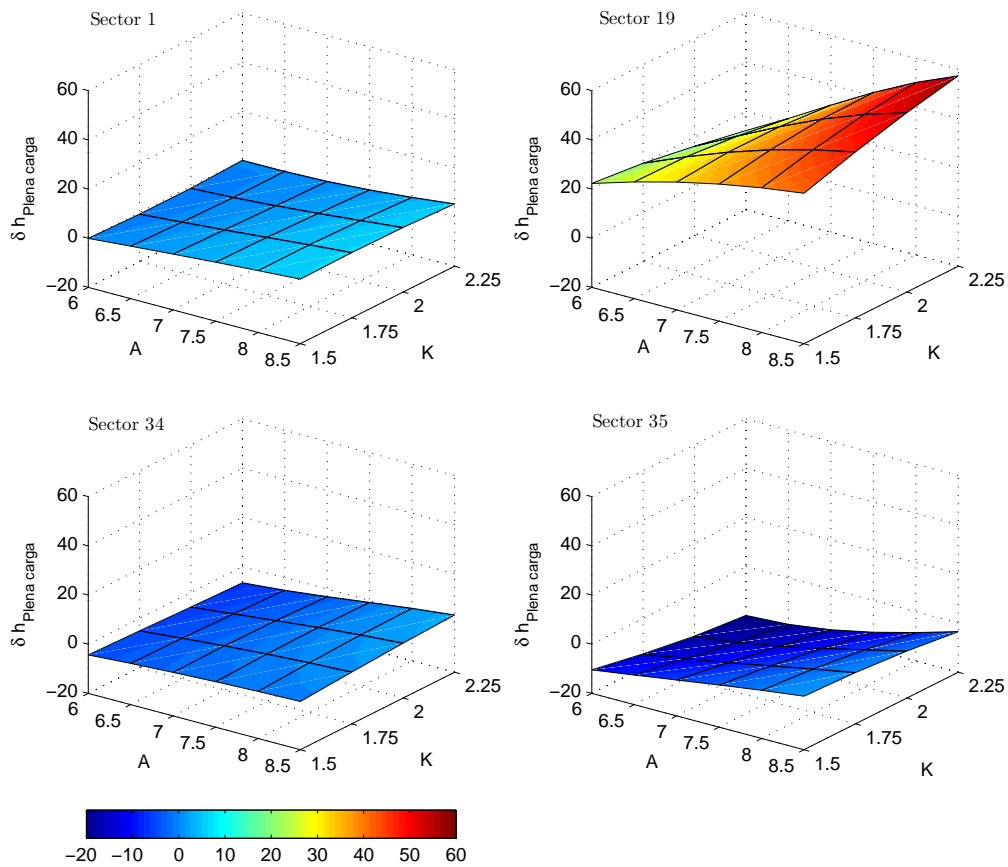
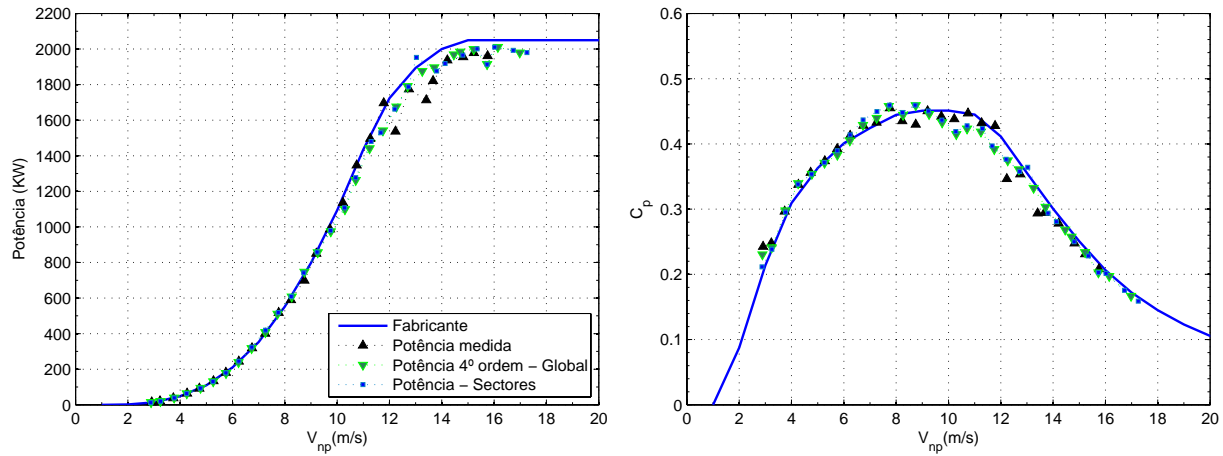
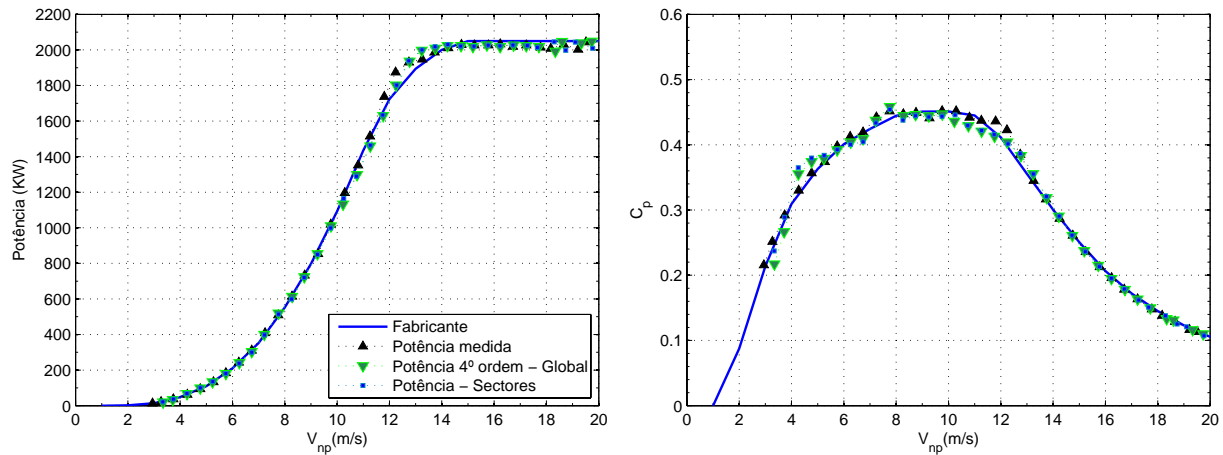


Figura 7.19: Sensibilidade ao factor de escala e de forma por sector - Coelheira

De igual modo analisou-se qual a curva de potência resultante quando adoptado a função transferência global e agrupando-se as ocorrências de sectores distintos. Tal foi apenas realizado para o aerogerador 12, devido a ser o que possui uma variação da função



(a) Aerogerador 8



(b) Aerogerador 12

Figura 7.20: Curvas de potência baseada em funções transferência sectoriais

transferência significativa entre sectores.

As curvas de potência baseadas em ocorrências dos sectores contidos a Norte, figura 7.21 subestimam ligeiramente a curva de potência devido à velocidade não perturbada determinada pela função transferência global ser excessiva. Contudo, tal como esperado não é a que revela maior disparidade devido a possuir um volume de ocorrências elevado na determinação da função transferência global.

A produção anual expectável no período de estudo para as curvas de potência baseadas nas ocorrências do quadrante Norte e Sul respectivamente é de 3644 e 3846 GWh, o equivalente a -58 a 40 de horas a plena carga de diferença relativamente à curva de potência do fabricante.

A quantificação da penalização de energia anual expectável em função do factor de forma e de escala foi realizada de modo análogo aos estudos prévios de sensibilidade.

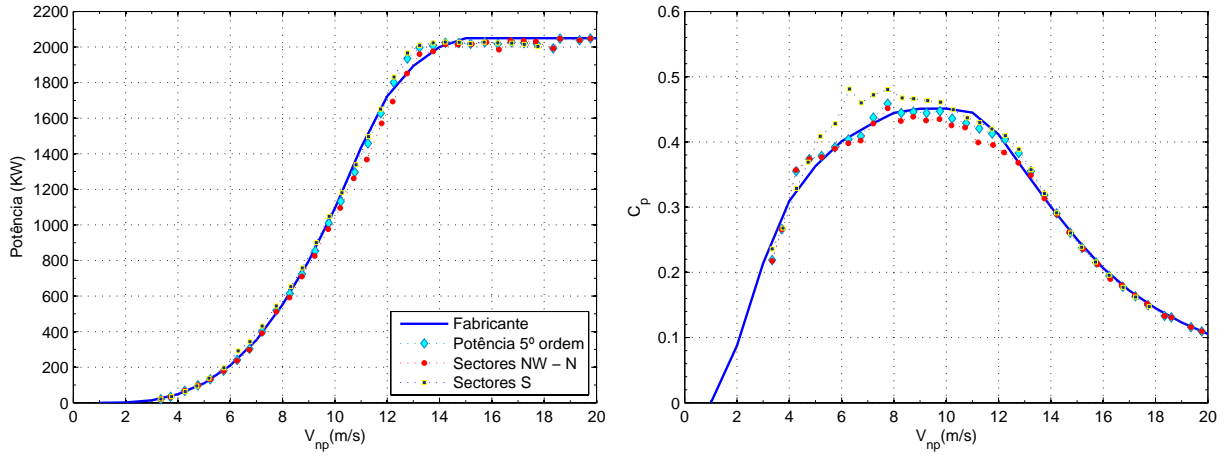


Figura 7.21: Curvas de potência resultantes das ocorrências dos sectores contidos a Norte e a Sul

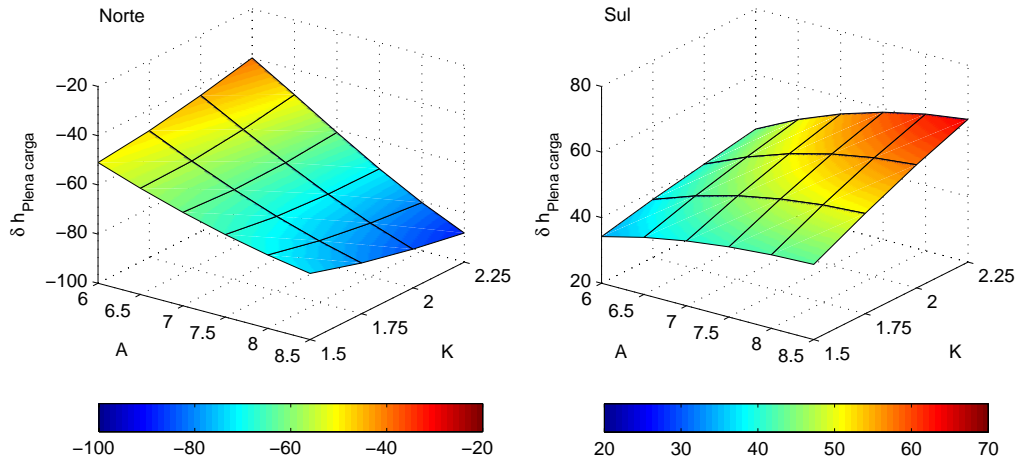


Figura 7.22: Sensibilidade ao factor de escala e de forma da função transferência global

### 7.1.7 Influência da turbulência

A morfologia das curvas de potência depende de igual modo da intensidade de turbulência. Estudo em aerogeradores, incluindo a fabricante E70 E4, demonstram que o aumento da intensidade de turbulência implica duas importantes alterações na curva de potência: uma diminuição do seu desempenho na passagem para plena carga e um melhoramento nas zona de velocidades onde ocorre  $C_p$  máximo. [Albers et al., 2007].

Para ser possível uma caracterização precisa dos ventos experimentados por cada aerogerador, recorreu-se a uma avaliação da turbulência do vento individualmente nas estações anemométricas de referência, de maneira a identificar variações de alta frequência nos sectores calibrados.

A turbulência deve-se, em grande parte, à fricção dos ventos com a superfície e aos efeitos de estratificação térmica do ar resultantes das variações de temperatura e densidade do ar e para o seu estudo utilizou-se a expressão [Tony Burton and David Sharpe, 2001]:

$$I = \frac{\sigma}{u} \quad (7.2)$$

em que  $u$  e  $\sigma$  representa a média e o desvio padrão da velocidade em cada 10 minutos.

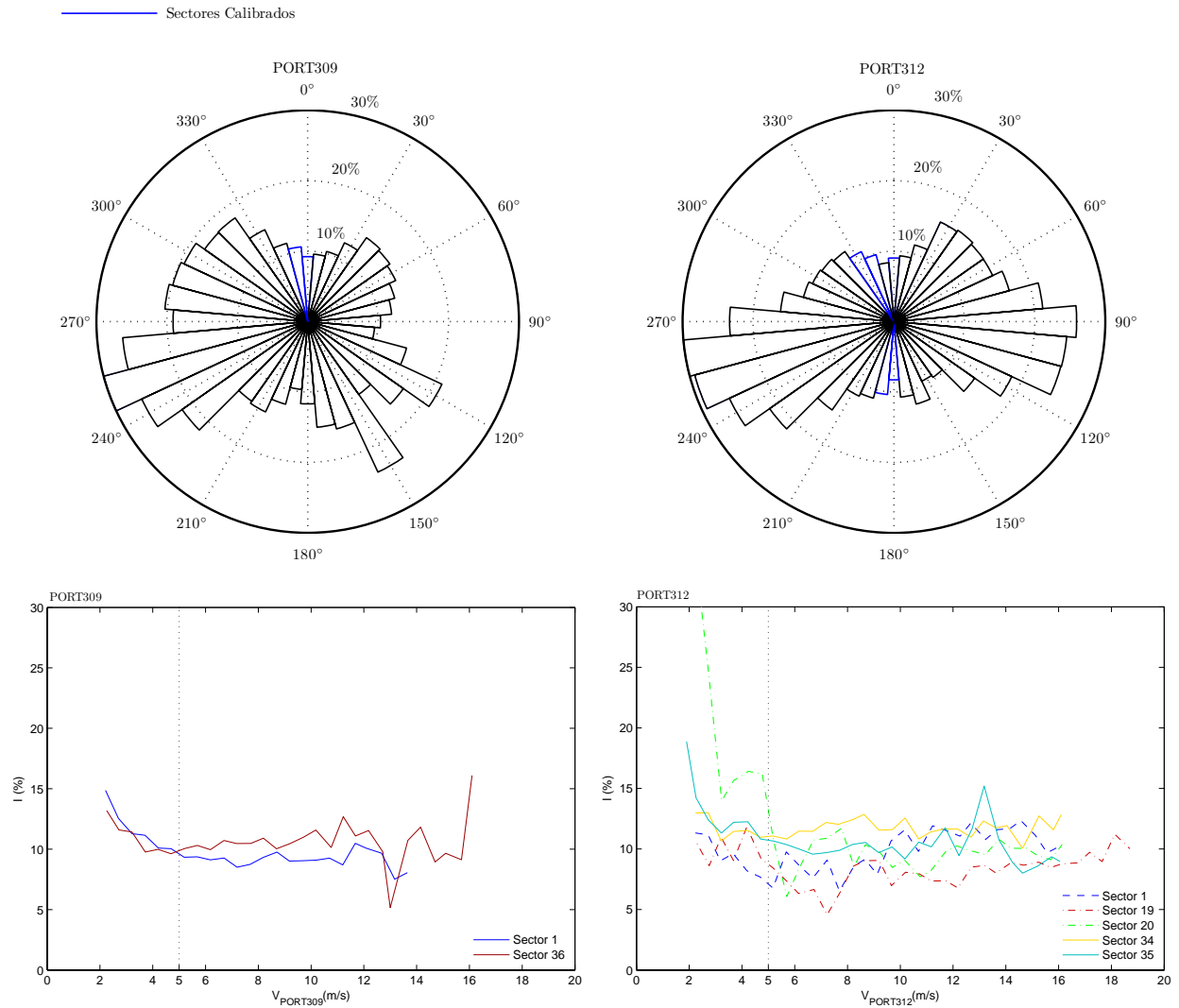


Figura 7.23: Intensidade de turbulência medida nas estações anemométricas PORT309 e PORT312

A análise dos índices de turbulência médios em cada estação anemométrica de referência, figura 7.23, foi realizada para valores de velocidade superiores a 5 m/s. De igual

modo, é evidenciada a intensidade de turbulência para cada sector calibrado. Os sectores 1, 19 e 20 não possuem um comportamento homogêneo devido ao número de ocorrências reduzido.

Em ambos os aerogeradores, os níveis de turbulência em função da velocidade são razoavelmente idênticos à excepção do sector 19 do aerogerador 12. Os sectores 34 e 35 possuem níveis de turbulências de maior grandeza e podem ser observados analogamente com o sector 1 e 36 do aerogerador 8.

As maiores contribuições para o índice de turbulência na zona de esteira provêm da turbulência na camada limite atmosférica e da gerada nas pás. Após a passagem do escoamento nas pás, existe uma elevada turbulência devido à degradação de vórtices nestas e de dissipação de energia do escoamento por cisalhamento, [U. Höglström et al., 1988].

Estudos numéricos e experimentais em aerogeradores com controlo de potência por *stall*, demonstram que o escoamento da zona de esteira numa distância equivalente a dois diâmetros, tende a recuperar a sua velocidade mais rápido sob condições de camada limite instável, isto é, níveis de turbulência crescentes do escoamento à montante do rotor, [Cedric Alinot and Christian Masson, 2004].

Quando sujeito ao escoamento de esteira de um aerogerador vizinho, a velocidade do anemómetro é significativamente influenciada devido aos índices de turbulência muito elevados, [A. Albers et al., 2006]. Todavia, a análise da figura 7.23 não evidencia dependência da relação entre velocidades para sectores com os mesmos índices de turbulência nas estações de referência.

A resposta dos anemómetros apresenta sensibilidade aos seguintes parâmetros: temperatura e densidade do escoamento, comprimentos de escala caracterizadores do espectro do vento e turbulência. Os anemómetros sujeitos a níveis de turbulência crescentes tendem a sobrestimar a velocidade devido ao fenómeno de *overspeeding*, concluindo-se que o défice de velocidades na realidade é superior.

Será expectável que os índices de turbulência variem da estação anemométrica para o local do aerogerador; porém podem ocorrer situações que em virtude da estabilidade da camada limite atmosférica tal não se verifica.

No anexo C encontram-se os índices de turbulência a 60 m das estações anemométricas temporárias e de referência que permitiram a calibração do local. Estes indicam que para os sectores calibrados essa variação é desprezável e apenas excepcionalmente, no sector 34 da estação PORT313 os índices diminuem abruptamente. De igual modo, verifica-se um ligeiro aumento do sector 35 da estação PORT310.

Poder-se-ia argumentar que esta análise não é condição suficiente, visto que as condições de turbulência na camada limite atmosférica podem variar significativamente do período em que se encontravam as estações temporárias para o de estudo. Contudo, uma análise mais profunda encontra-se fora do âmbito desta tese e assumir-se-á a ausência desse efeito.

### 7.1.8 Influência do ângulo de ataque

A magnitude dos residuais dos ajustamentos é mais intensa nas zonas de diminuição da aceleração angular, revelando que as condições do escoamento em torno do anemómetro variam significativamente.

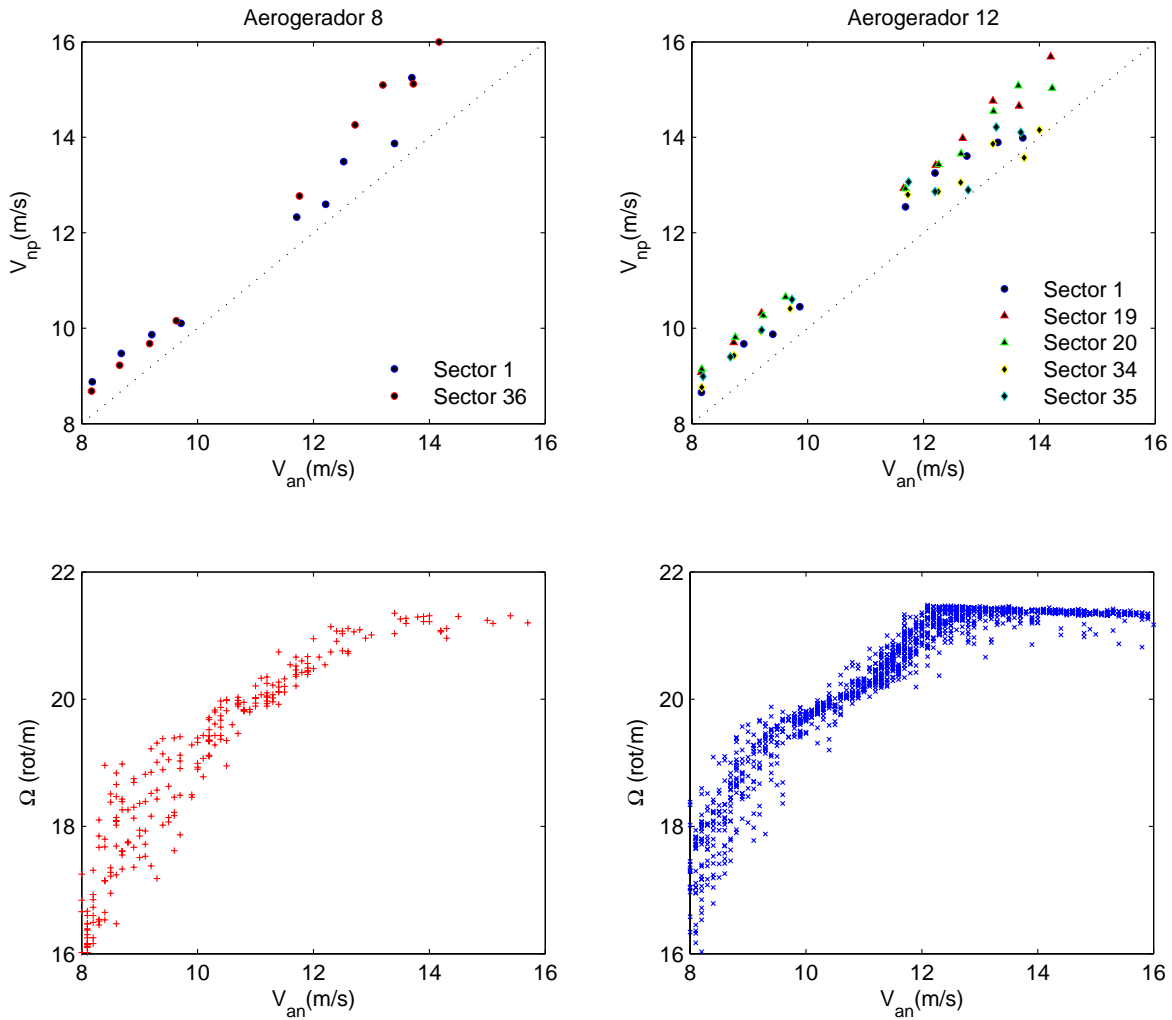


Figura 7.24: Curvas de rotação dos aerogeradores

O ângulo de ataque das pás, nos aerogeradores em estudo, é obtido por um algoritmo específico que permite adquirir o valor do ângulo de ataque em função da potência gerada

por este. A quantificação do ângulo de ataque neste trabalho foi inviabilizada devido ao desconhecimento desse algoritmo. No entanto, o auxílio das curvas de rotação de cada aerogerador permite uma análise qualitativa da sua influência.

As curvas de rotação dos aerogeradores são caracterizadas por três zonas com aceleração angular do rotor distinta. A figura 7.24 mostra a relação entre as velocidades por sector nesses instantes e evidencia uma situação distinta para o sector 34 e 35 após a variação do ângulo de ataque: um aceleração abrupto do escoamento na zona de esteira.

Este não é idêntico em todos os sectores permitindo concluir que as condições do escoamento a que o anemómetro na *nacelle* está sujeito, não depende unicamente da variação do ângulo de ataque, mas também da orografia circundante ao aerogerador.

Conclui-se que a transmissibilidade de uma função transferência não depende só das condições orográficas mas dos parâmetros de controlo de potência do aerogerador.

### **7.1.9 Influência do desalinhamento do rotor**

Nesta secção pretende-se estudar a sensibilidade da relação entre as velocidades em função do azimuth do escoamento relativamente ao plano perpendicular do rotor. As análises prévias, pressupõem que entre a estação anemométrica e o aerogerador o escoamento sofre uma variação de direcção desprezível não representando totalmente a realidade.

O estudo enunciado implica uma calibração da direcção do escoamento de forma a aferir a variação de direcção do escoamento. Esta remonta ao tratamento de dados contidos no período de 9 de Maio a 19 de Outubro de 2005, na qual se encontrava instalada a estações anemométrica PORT313. Todo o percurso percorrido pelo escoamento altera a sua direcção, sendo expectável que esses efeitos diminuam com o aumento da velocidade. Devido a isto, os factores de distorção da direcção foram determinadas para 3 gamas de velocidades: 2 a 8 m/s; 8 a 16 m/s; velocidades superior a 16 m/s.

De forma a legitimar a calibração de direcção do local prévia, procedeu-se primeiramente ao estudo da variação de direcção do catavento na estação da referência PORT312 durante o período de 1 dia, 21 de Abril 2008, definindo 1Hz como frequência de aquisição de dados. A disponibilidade no período é de 100% e foi indagada individualmente para cada sector calibrado, a direcção das ocorrências nos instantes seguintes a se ter verificado um registo nos sectores calibrados, permitindo a aferir a existência de variações súbitas nas direcções do escoamento e validando todo o processo seguinte.

A frequência dessa variação de direcção no instante seguinte para cada sector calibrado encontra-se representado na figura 7.25 sob a forma de índice de probabilidade.



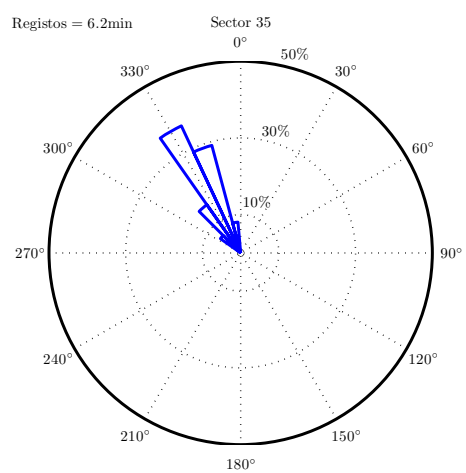
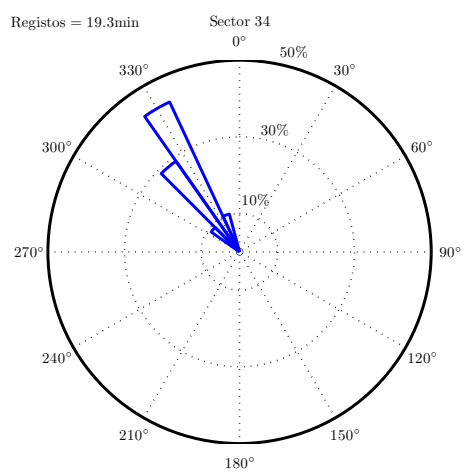
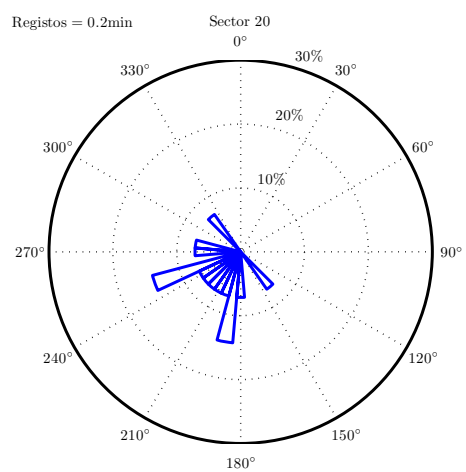
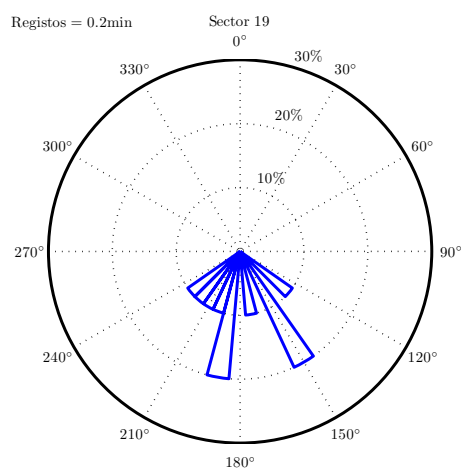
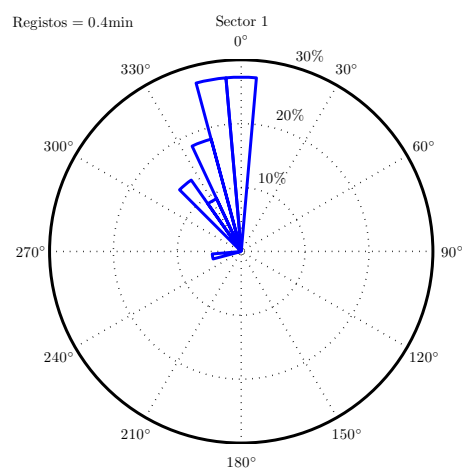


Figura 7.25: Sensibilidade à mudança de direcção do escoamento para os sectores calibrados

Os três primeiros sectores do gráfico 7.25, sectores 1, 19 e 20 apresenta variações significativas de direcção, no entanto, não são suficientemente representativos devido ao volume amostral relativamente restrito. Os sectores 34 e 35 que possuem maior complexidade orográfica, demonstram que nos respectivos sectores calibrados as ocorrências subsequentes ocorrem em sectores adjacentes, evidenciando a nulidade de variações de direcção súbitas no escoamento.

O gráfico 7.25 sugere que a análise do desalinhamento entre o plano do rotor e o escoamento não implica grandes erros quando realizada em dados sob a forma de médias de 10 minutos, contudo, é de referir a impossibilidade de realizar a mesma análise à estação de referência PORT309 e admite-se devido à aparente menor complexidade orográfica, a inexistência de variações súbitas de direcção resultantes da orografia do terreno.

Em ambos os aerogeradores para velocidades superiores a 16 m/s não se obteve um número de ocorrências suficiente que permite-se a calibração. O mesmo verificou-se para o sector 19 do aerogerador 12 devido às condições de vento no período considerado e os ajustamentos encontram-se no anexo D. A tabela 7.3 sumariza o desalinhamento médio entre as direcções registadas em ambas as estações para Candal e Coelheira.

Tabela 7.3: Desvios médios entre a estação anemométrica temporária e permanente

Estação anemométrica	Bin	Desvio médio entre estações(°)		
		$2 \leq v < 8$ m/s	$8 \leq v < 16$ m/s	$v \geq 16$ m/s
PORT309	0°	6.9	3.6	-
	350°	7.3	4.0	-
PORT312	0°	6.5	4.7	-
	180°	6.0	-	-
	190°	4.9	5.5	-
	330°	5.0	0.9	-
	340°	4.7	1.3	-

A determinação dos factores de correcção da direcção do escoamento em conjuntura com os registos de SCADA permitem calcular o desalinhamento,  $\delta$ , entre este e o plano do rotor. Diferenças de direcções do escoamento à direita relativamente ao vector perpendicular ao plano do rotor, foram referenciadas negativas.

Os registos de SCADA, do mesmo modo que os cataventos, encontram-se referenciados ao Norte geográfico e não foram admitidos offsets entre as direcções.

Para ambos os aerogeradores verifica-se que estes acompanham as direcções do escoamento, sendo maior o seu desalinhamento para baixas velocidades, e diminuindo com

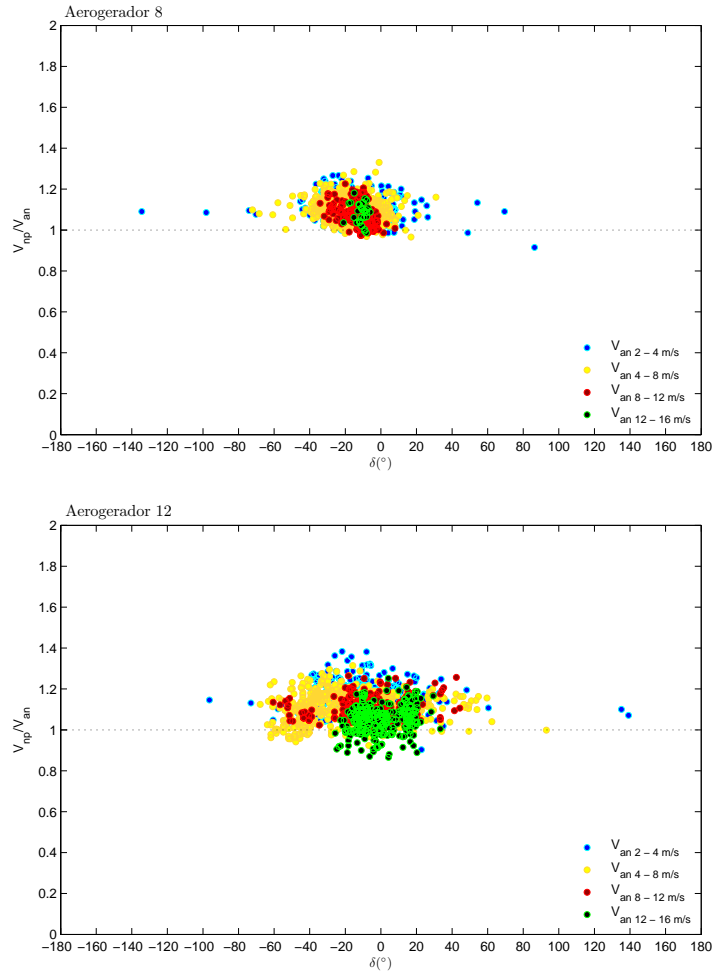


Figura 7.26: Desalinhamento entre o plano do rotor e o escoamento para ambos os aerogeradores

o aumento deste. Tal revela consonância, visto que, descompensamentos significativos a altas velocidades colocavam em causa toda a estabilidade estrutural do aerogerador. Contudo, é notório uma maior incidência de descompasamentos à escoamentos à esquerda do plano perpendicular ao rotor do aerogerador.

Para o aerogerador 12 este facto é justificável pelos gráficos 7.25 em que se denota que para os sectores com maior número de ocorrências na análise, sectores 34 e 35, o escoamento tende a diminuir a sua direcção em  $10^{\circ}$ .

Admitindo que os efeitos de desfasamentos simétricos na velocidade medida pelo anemómetro na *nacelle* são idênticos é legítimo a representação das velocidades para gamas de desalinhamento equidistânciadas de  $10^{\circ}$ . O sector 1, 19 e 20 do aerogerador 12 foram excluídos devido ao número restrito de ocorrências.

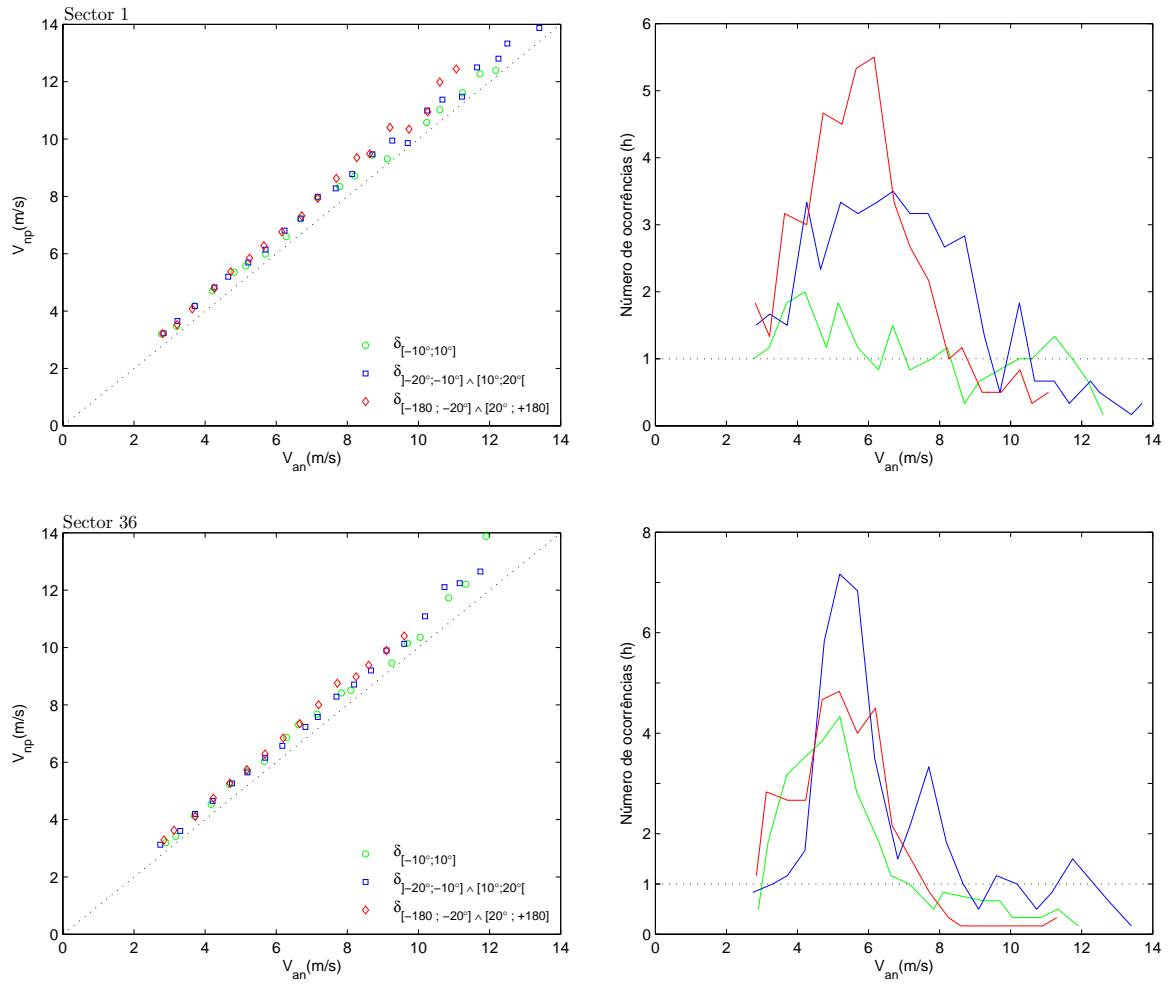


Figura 7.27: Relação entre as velocidades para diferentes desalinhamentos - Aerogerador 8

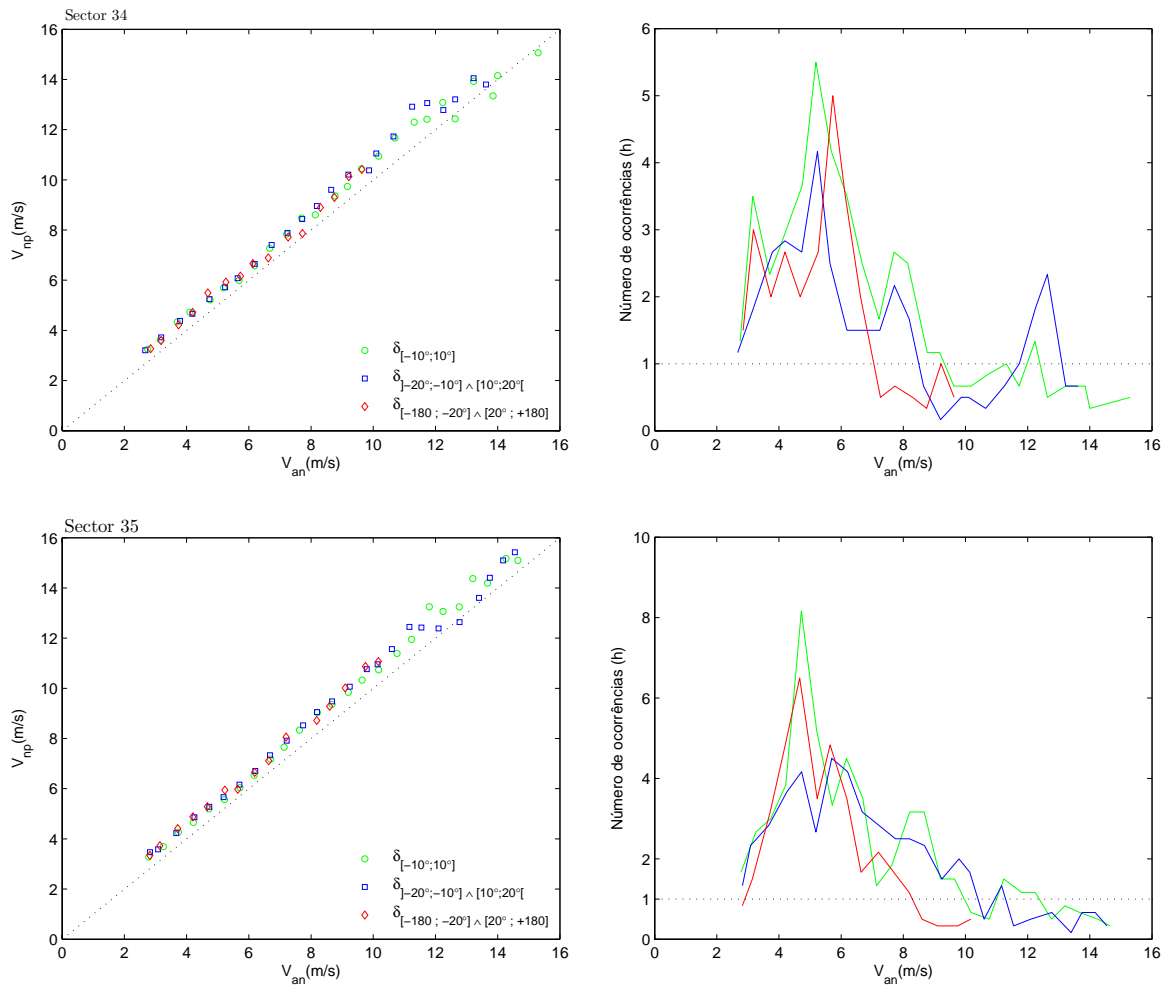


Figura 7.28: Relação entre as velocidades para diferentes desalinhamentos - Aerogerador 12

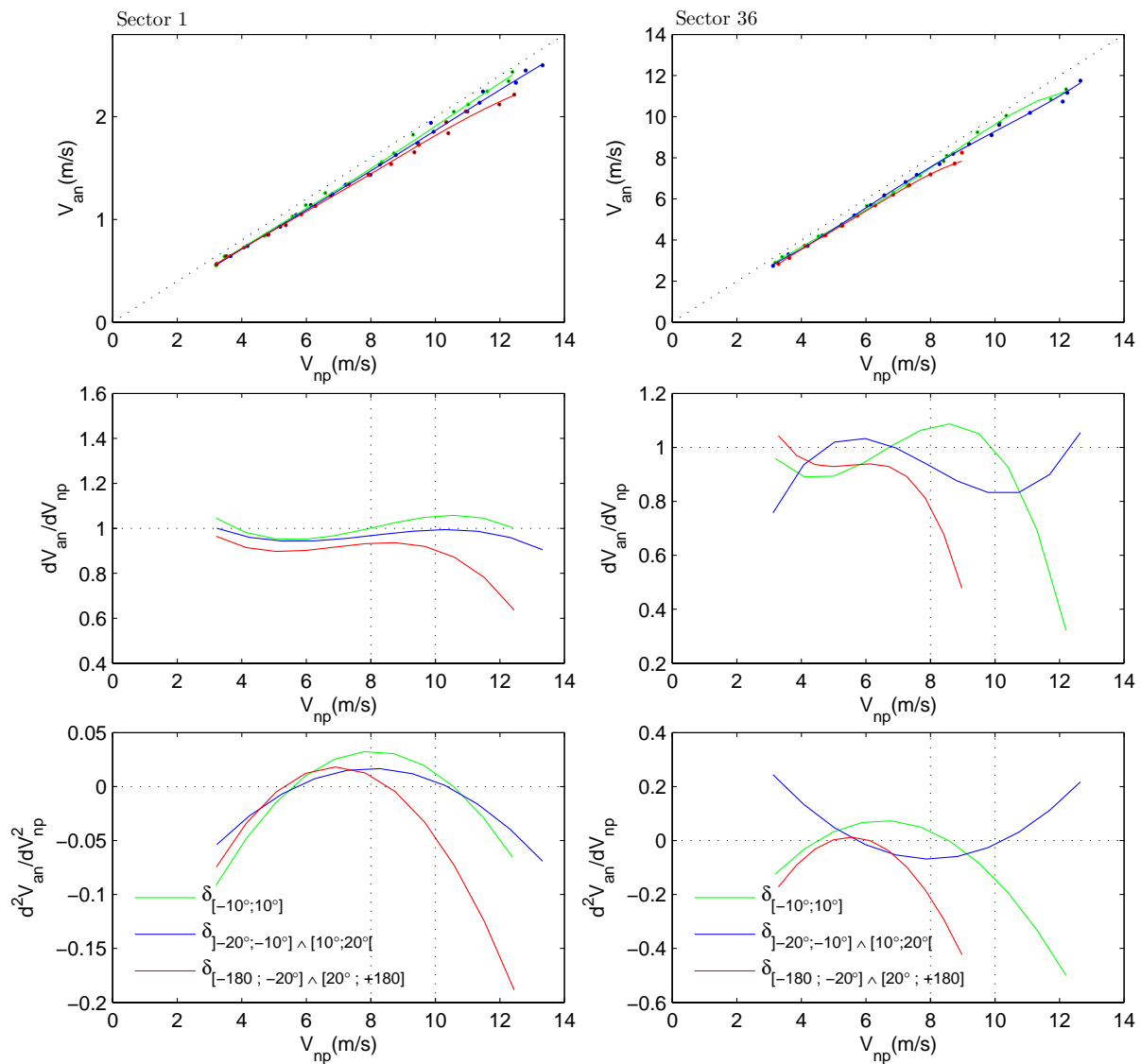


Figura 7.29: Comportamento da velocidade do escoamento para diferentes desalinhamentos - Aerogerador 8

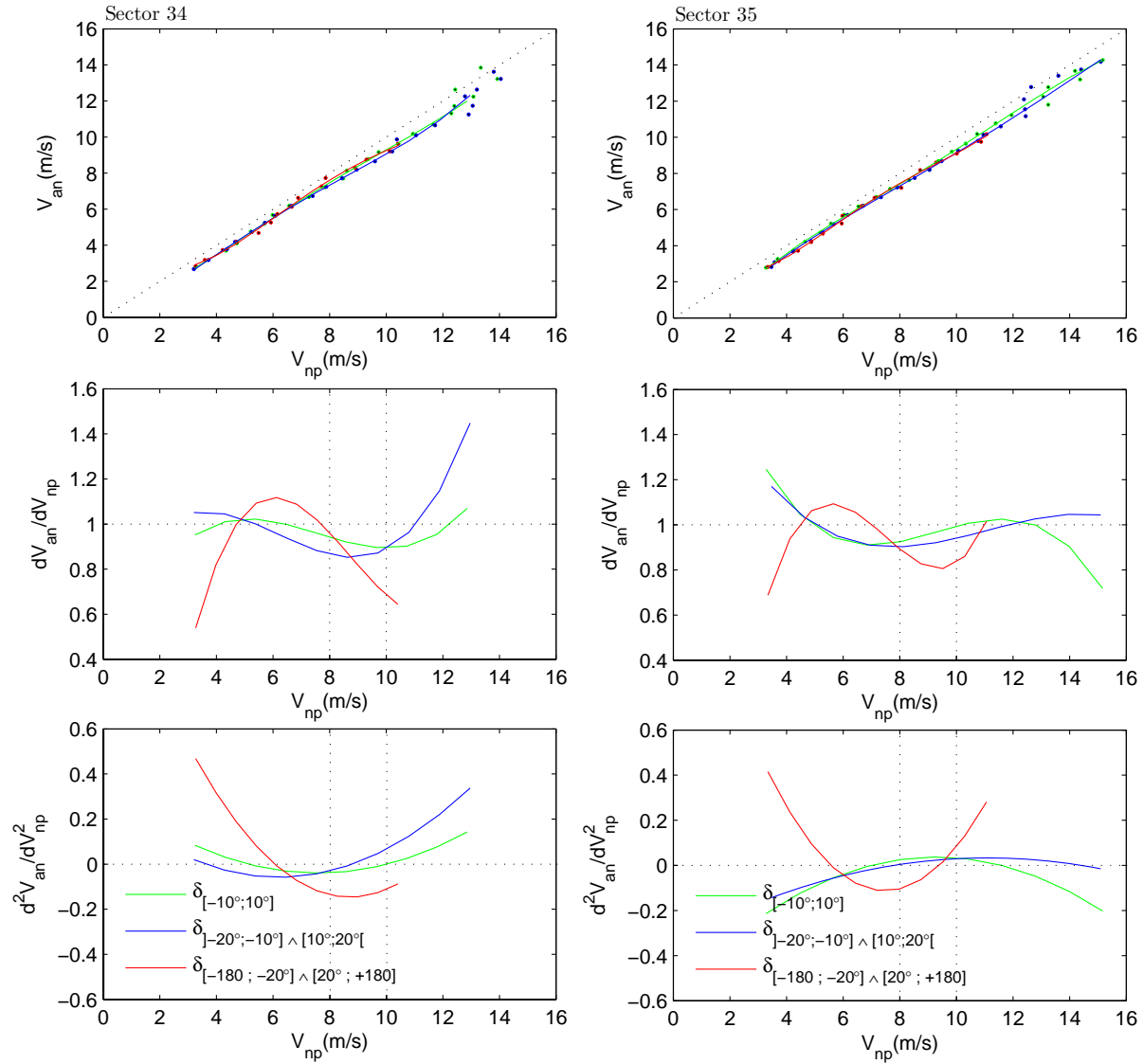


Figura 7.30: Comportamento da velocidade do escoamento para diferentes desfasamentos - Aerogerador 12

As figuras 7.27, 7.28, 7.29, 7.30 representam o comportamento e a sensibilidades das velocidades em função desalinhamento para os sectores calibrados dos aerogeradores em estudo. No aerogerador 8 para ambos os sectores verifica-se que o déficit de velocidades é mais acentuado à medida que aumenta o desalinhamento entre o plano do rotor e a direcção do escoamento e a sua análise é legítima até velocidades de 8 m/s.

O sector 1 revela um comportamento semelhante para os diferentes desfasamentos ao longo do seu domínio de velocidades, figura 7.29. Para velocidades na gama dos 8 a 10 m/s verifica-se um comportamento similar para o sector 36, contudo, de maior magnitude de

aceleramento e desaceleramento para escoamentos alinhados com o plano do rotor; Porém, este diverge para diferentes desalinhamentos.

Para o aerogerador 12 o déficit de velocidades para diferentes desfasamentos é muito idêntico, figura 7.28, sendo a sua análise remetida para os factores de sensibilidade.

Primeiramente, denota-se que um alinhamento do escoamento leva a um comportamento simétrico nos sectores. Para valores crescentes de desalinhamento, o comportamento é distinto e verifica-se uma intensificação da aceleração e desaceleração do escoamento.

As simplificações inerentes a estudos de simulação numérica ainda não permitem uma caracterização completa da zona de esteira, devido à sua complexidade espacial, [Stefan Ivanell, 2005].

Trabalhos realizados sobre o escoamento em torno do perfil aerodinâmica revolucionário do fabricante para velocidades de 8 m/s, sob a condição de ângulo de ataque constante, alinhamento com o plano do rotor e um perfil uniforme a montante, na fronteira delineada entre a *nacelle* e a pá existe um acréscimo de velocidade tangencial do escoamento resultando numa diminuição acentuada de pressão. De igual modo é demonstrado que não existe descolamento da camada limite na zona adjacente à *nacelle*, ao contrário do antigo design das pás, [J. Johansen et al., 2002].

Não é indicada a posição exacta no anemómetro na *nacelle*, mas uma análise grosseira permite dizer que a velocidade axial na zona onde se localiza o anemómetro é de menor magnitude, revelando consonância com os resultados obtidos.

De igual modo é demonstrada a existência de formação de vórtices no terminar do corpo da *nacelle* que podem influenciar as medições do anemómetros.

Análises do comportamento dos anemómetros quando sujeitos a impulsos cíclicos, revelam um engrandecer dos fenómeno de *overspeeding* para níveis crescentes de turbulência e da frequência desses impulsos, [Troels Friis Pedersen, 2004]. Todavia, a inércia do anemómetro e a sua forma é factor essencial à sua análise, [L.Kristensen, 1998], e a impossibilidade da sua caracterização inviabiliza uma análise sobre este assunto.

Conclui-se que a norma IEC61400 parte 12 revela-se adequada devido a impor uma calibração da direcção do escoamento do local. Contudo, não quantifica uma incerteza associada ao desalinhamento do rotor. Conclui-se também que a transmissibilidade de um ajustamento polinomial previamente determinado é de difícil realização, devido a poder variar significativamente a evolução do déficit de velocidades ao longo do seu domínio com o alinhamento do rotor com o escoamento.



### 7.1.10 Rotor parado

No sentido de analisar a influência da geometria na relação de velocidades excluiu-se, dentro dos sectores calibrados, todos os dados de SCADA que apresentassem velocidade angular diferente de zero e em que o anemómetro estivesse congelado. As figuras 7.49 e apresenta as diferentes relações para os aerogeradores estudo.

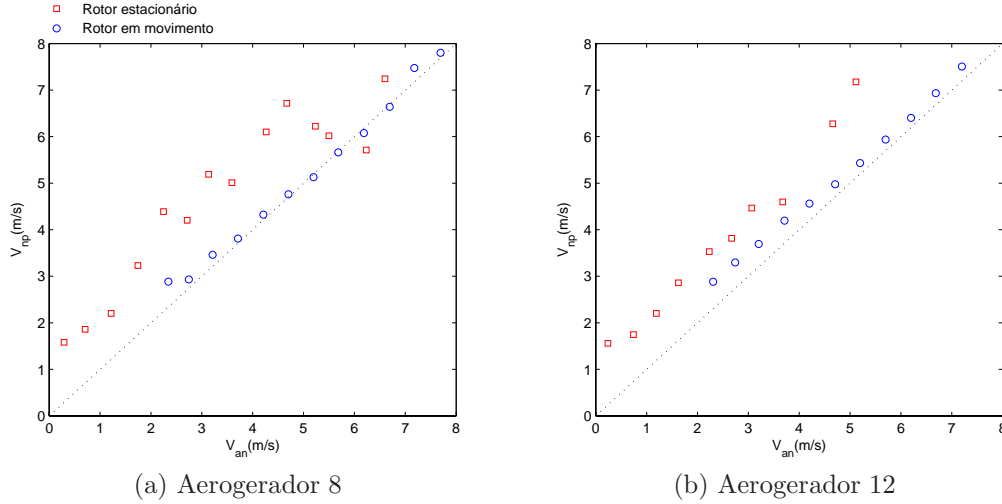


Figura 7.31: Relação de velocidades para o rotor parado

O défice entre as velocidades para os aerogeradores em estudo possui uma maior magnitude às previamente visualizadas. Os dados de SCADA não possuem um histórico da posição angular do rotor e este comportamento deve-se à ocorrência de situações em que as pás se encontram em "posição de bandeira" e coincidem com a posição do anemómetro obstruindo o escoamento e diminuindo abruptamente a velocidade medida por este. Entende-se como posição de bandeira o rotor encontrar-se parado mas as pás podem rodar livremente segundo o seu eixo longitudinal.

Constata-se que no aerogerador 8 na gama de velocidades compreendidos dos 5 a 7 m/s, os bins não se encontram sob a situação anteriormente descrita e evidenciam uma tendência para o aceleração do escoamento com o aumento de exposição do anemómetro a este. A diminuição da secção entre as pás em conjunto com o princípio de Bernoulli, justificam esse excedente de velocidade.

È de referir que não se exclui dados em função da diferença do azimuth do escoamento com o plano do rotor, *yaw error* e, como demonstra a figura 7.26, esta diferença aumenta com o diminuir das velocidades. Quando associada à ausência de movimento do rotor podera alterar significativamente o comportamento entre as velocidades, porém, a figura 7.49 não revela indícios da sua influência nos bins.

De igual modo, o comportamento observado é consequência da geometria da *nacelle* e da localização do anemómetro nesta, e uma maior caracterização do natureza do escoamento implicaria o mesmo procedimento sob geometrias distintas da *nacelle* e para diferentes alturas do anemómetro.

## 7.2 Parque eólico do Outeiro

O aerogerador 1 do parque eólico do Outeiro é o objecto de estudo desta secção. Este consiste num melhoramento da E66-20, originalmente com uma geometria de pás em que a corda não se estendia até à fronteira do rotor por questões maioritariamente estruturais e na presunção de que a quantidade de energia aproveitada em redor do rotor era insignificante, [Enercon, 2004].

Com o intuito de maximizar o rendimento do aerogerador, a fabricante adaptou o rotor e as pás da E70 permitindo classificá-la como híbrido entre a geometria da E70 e a mecânica e electrónica inerente ao modelo E66.



(a) Design prévio das pás



(b) Novo design aerodinâmico

Figura 7.32: Design característicos da pás do aerogerador

### 7.2.1 Metodologia e directrizes

A análise do comportamento da velocidade medida pelo anemómetro da *nacelle* envolve, analogamente ao caso prévio, a eliminação de dados não representativos da medição da curva de potência e as directrizes adoptadas são idênticas.

O aerogerador em estudo possui uma particularidade no carácter das curvas de potência baseadas no anemómetro na *nacelle* no seu período de estudo. Este facto deve-se ao funcionamento anómalo deste e a sua alteração no mês de Maio, implicando uma análise repartida da relação entre as velocidades.

As medições pelo anemómetro na *nacelle* acarretam elevadas incertezas, não só por ser uma zona fortemente perturbada mas devido a estes não se encontrarem calibrados. Todavia, a sua calibração não é usual devido à sua função primordial e os fabricantes admitem incertezas na ordem do 1 a 3%, [R. Coquilla and J. Obermeier, 2004], permitindo analisar qual o impacto da curva de potência via anemómetro da *nacelle* sob condições de instrumentação distintas.

As curvas de potência encontram-se representadas na figura 7.33 e clarificam a diferença destas baseadas na velocidade do anemómetro para os dois períodos de estudo.

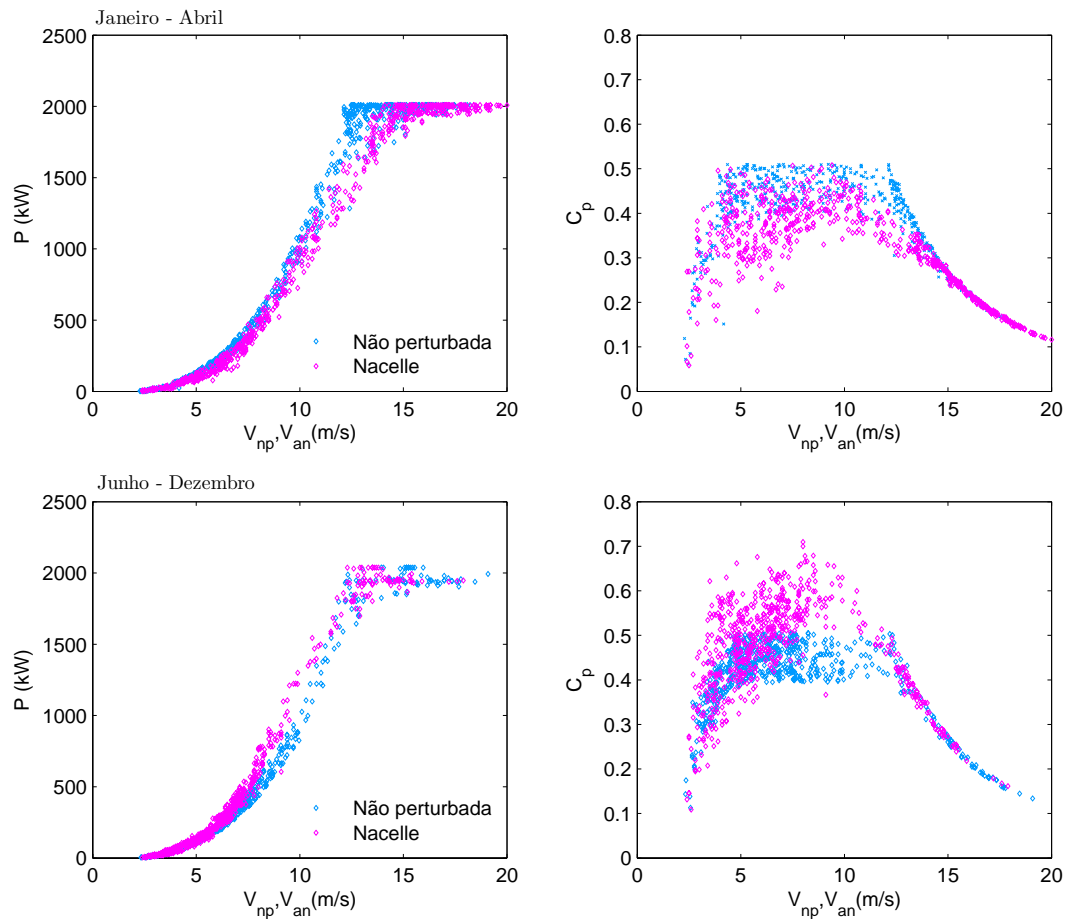


Figura 7.33: Curvas de potência - Outeiro

A exclusão de dados permitiu um volume de ocorrências de 105 e 100 horas nos sectores calibrados para ambos os períodos em estudo, encontrando-se representado sobre a forma percentual na figura 7.34.

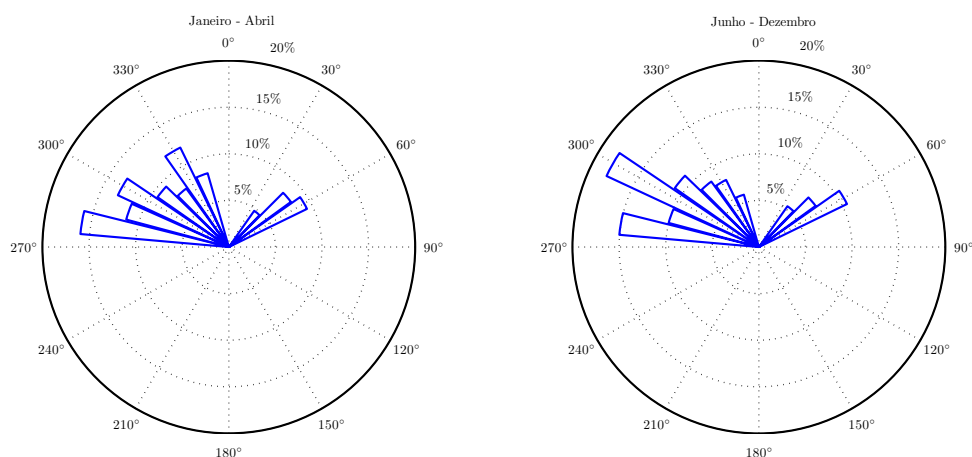


Figura 7.34: Número de ocorrências por sector para o aerogerador em estudo do parque eólico do Outeiro

### 7.2.2 Relação entre velocidades

A figura 7.35 demonstra a relação entre as velocidades para o aerogerador 1 do parque eólico do Outeiro sob a forma de bins. A norma IEC61400 Parte 12 - 2, impõe um limite mínimo de ocorrências equivalente a 30 minutos, isto é, três ocorrências por bin e este será tomado como referência para a análise seguinte, [bib, 2008].

As condições de vento verificadas nos primeiros quatro meses permitem um volume de ocorrências considerável, sendo o período de Junho a Dezembro significativamente dominado por baixas velocidades devido a sazonalidade do vento e a diminuta disponibilidade dos meses de Novembro e Dezembro.

No primeiro período de estudo, Janeiro a Abril, o anemómetro mede uma velocidade superior à não perturbada, e tende a aumentar esse excesso com o engrandecer da sua velocidade medida, podendo se dever uma medição da velocidade deficiente devido a algum problema técnico que justifique a sua substituição. No período seguinte, Abril a Dezembro, verifica-se um défice de velocidades tendenciosamente crescente ao longo do domínio de velocidades e semelhante aos aerogeradores previamente estudados.

O comportamento do desvio padrão é idêntico aos aerogeradores previamente estudados do parque eólico de Candal/Coelheira, isto é, crescente com o aumento da velocidade do anemómetro. Verifica-se que na mudança de ângulo de ataque o seu valor tende a crescer súbitamente. Todavia, não é legítimo a comparação da sua magnitude devido ao número de ocorrências relativamente reduzido de ambos os períodos.

Na passagem para plena carga constata-se um aumento significativo do desvio padrão e um máximo pontual da taxa de variação da velocidade do anemómetro relativamente à

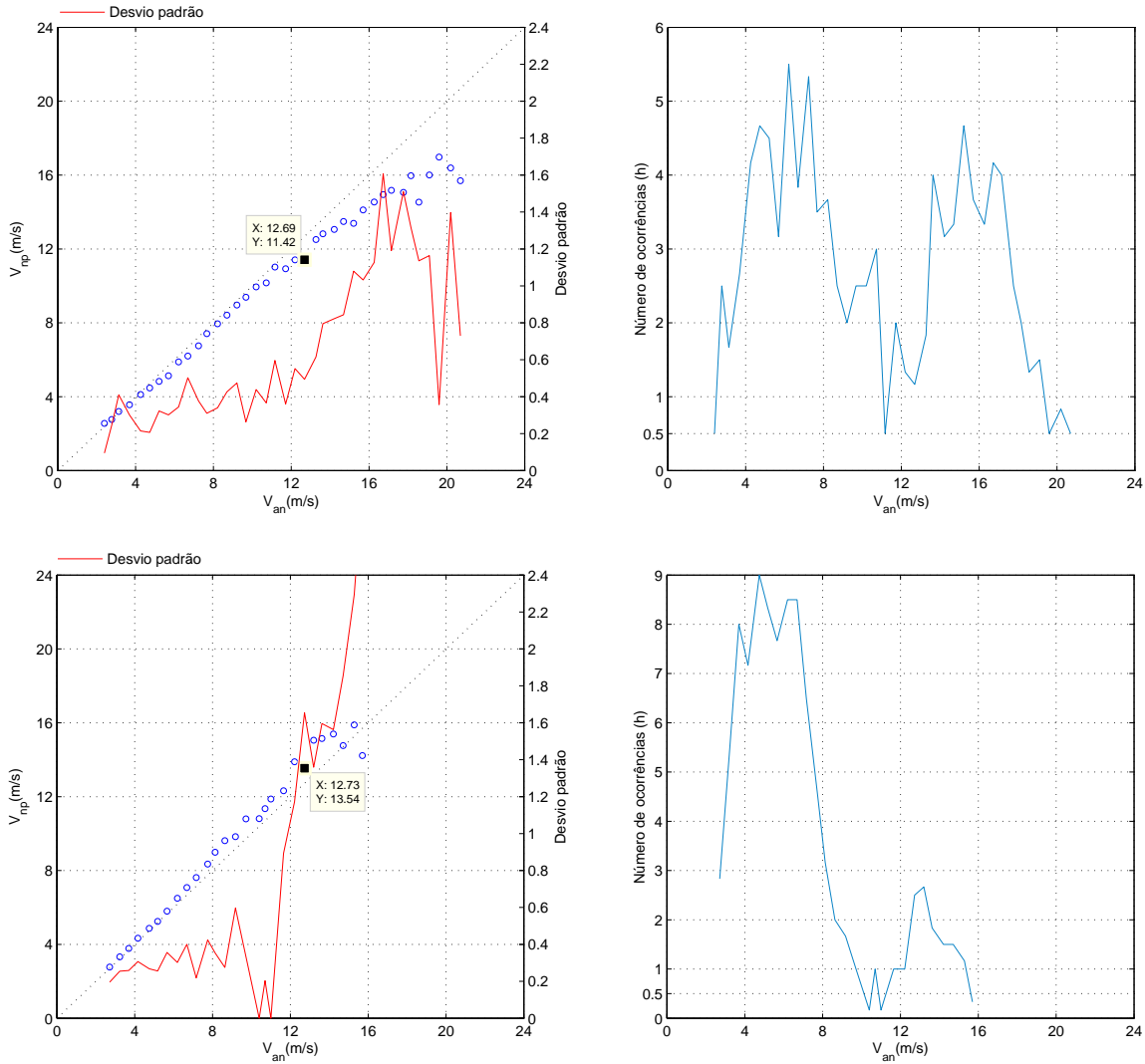


Figura 7.35: Relação entre velocidades para os diferentes períodos de estudo - Outeiro

não perturbada, evidenciado pelos dois pontos assinalados no gráfico 7.35. A figura 7.36 permite uma visualização da relação entre velocidades.

A taxa de variação da velocidade do anemómetro relativamente à não perturbada é decrescente e positiva até sensivelmente 4 m/s para ambos os períodos de estudo, evidenciando uma diminuição do aceleramento na zona de esteira. O período de Janeiro a Abril revela um aceleramento ao longo do seu domínio justificado pela deficiência de funcionamento do anemómetro, revelando que a instrumentação utilizada em todo o processo é um factor proeminente e que pode variar significativamente o gradiente de velocidades.

A entrada do ângulo de ataque ocorre na mesma gama de velocidades dos aerogeradores previamente estudados e à semelhança destes verifica-se, em ambos, um acelera-

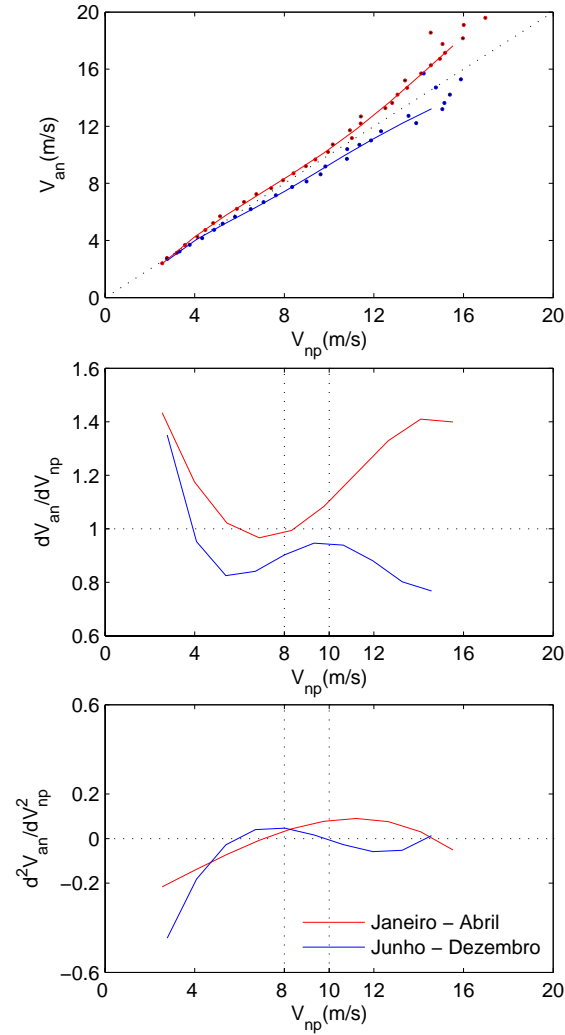


Figura 7.36: Comportamento da velocidade do escoamento na zona de esteira para o aerogerador do Outeiro

mento acentuado da velocidade medida pelo anemómetro.

### 7.2.3 Função transferência

Da figura 7.37, tal como esperado, verifica-se que os ajustamentos são distintos em ambos os períodos de estudo e que existe uma diferença significativa nos residuais entre um ajustamento de 4º e 5º ordem.

O comportamento das velocidades entre Junho e Dezembro permite concluir que o ajustamento é fortemente dependente da orografia do local e a aplicação da função transferência em outros locais.

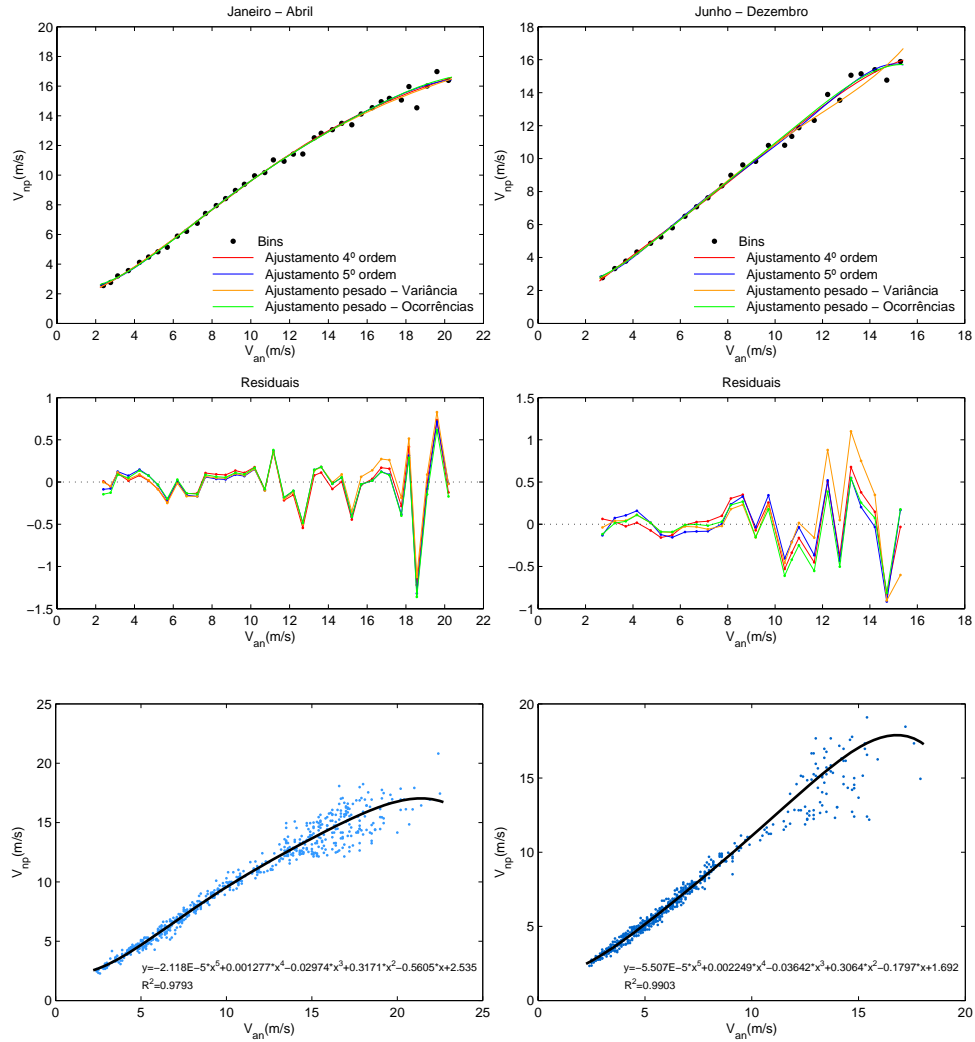


Figura 7.37: Funções transferência

## 7.2.4 Curvas de potência

Devido ao controlo de potência idêntico dos aerogeradores de Candal/Coelheira e do Outeiro, a determinação das curvas de potência para cada um dos períodos em estudo segue a metodologia anteriormente enunciada.

Neste capítulo, primeiramente será quantificado a adequabilidade dos ajustamentos polinomiais determinados para cada um dos períodos. Seguidamente, a penalização de produção expectável quando utilizada as funções transferência do anemómetro danificado e a determinada para os aerogeradores do parque eólico de Candal/Coelheira.



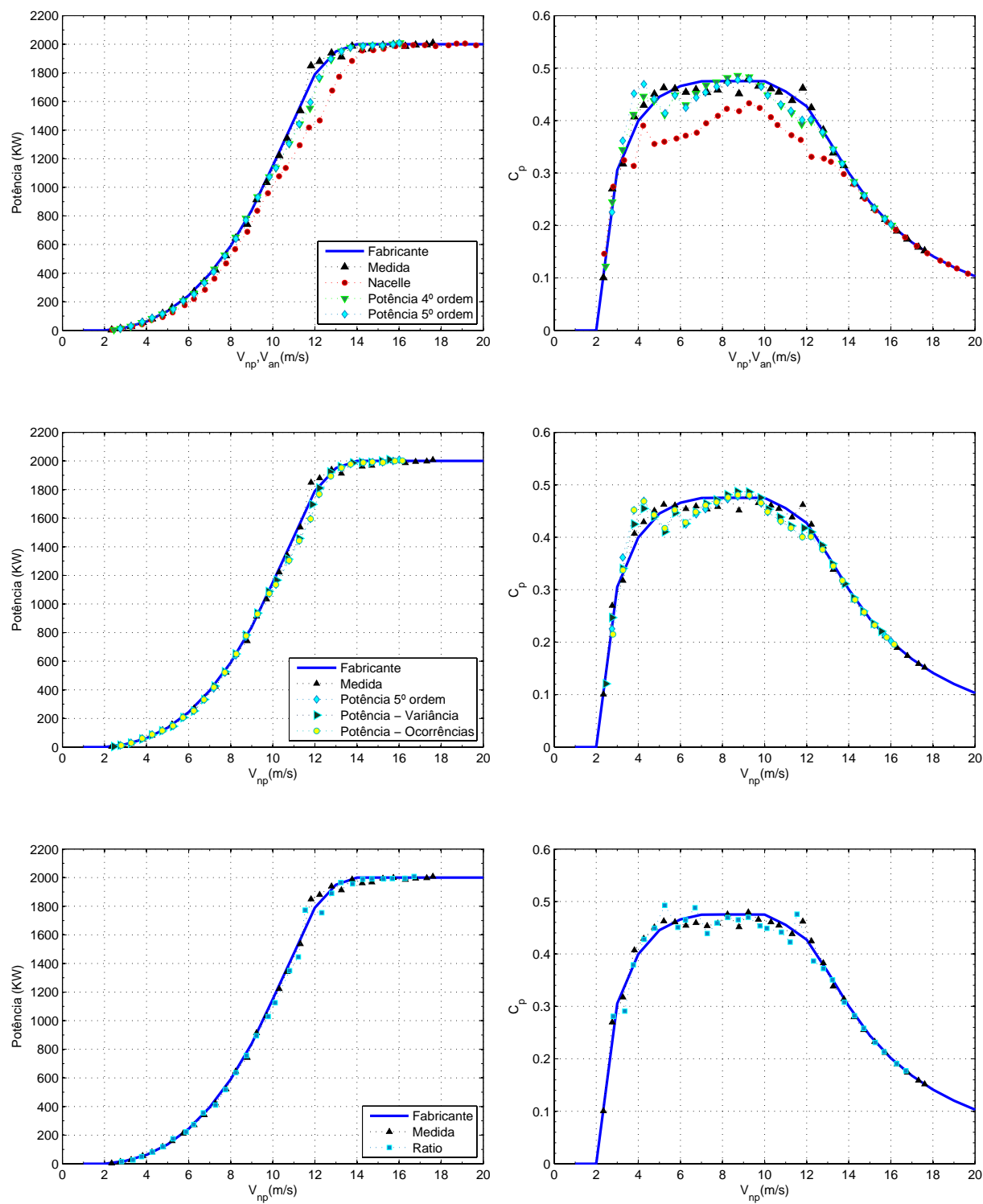


Figura 7.38: Curvas de potência para o período de Janeiro a Abril

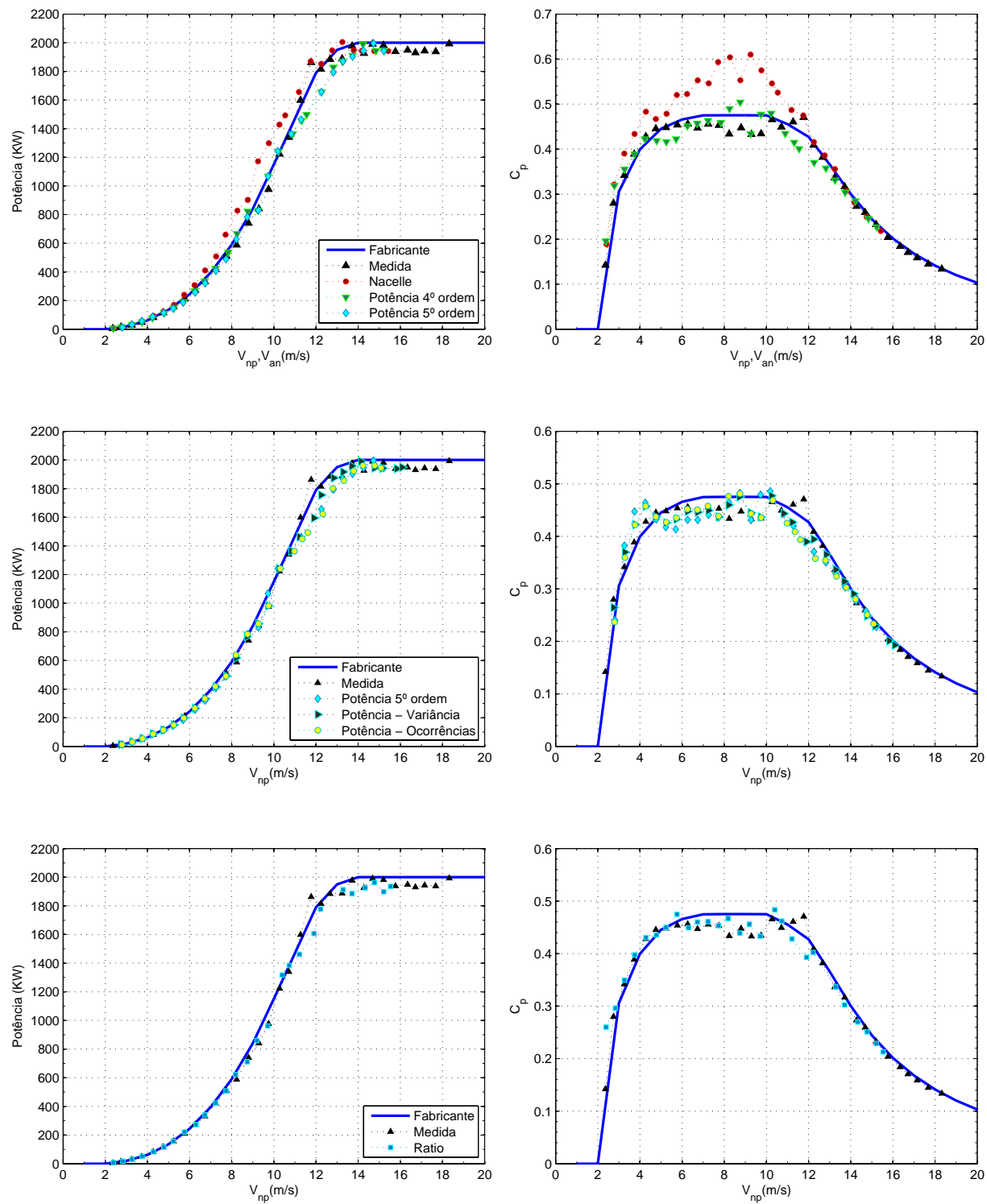


Figura 7.39: Curvas de potência para o período de Junho a Dezembro

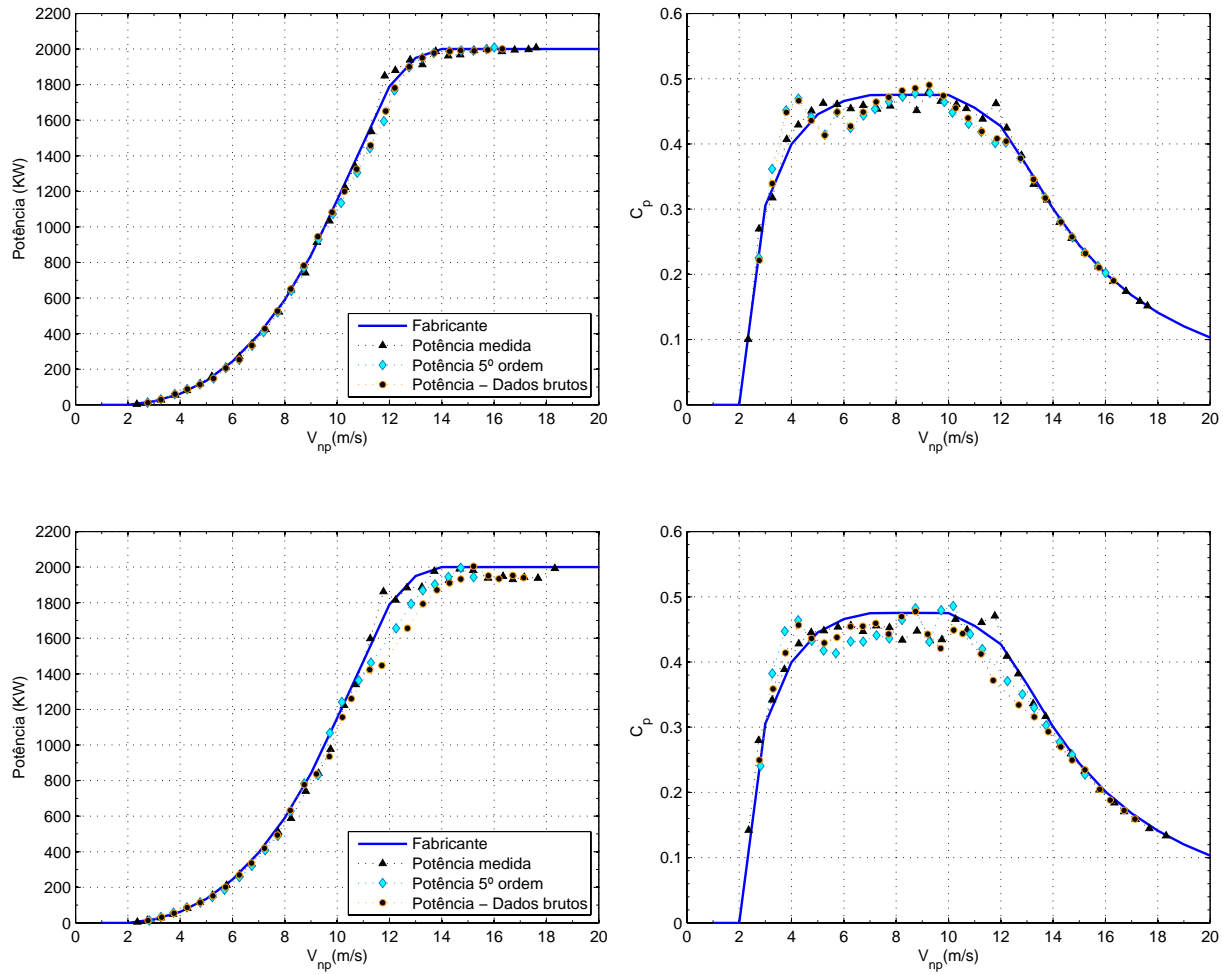


Figura 7.40: Curvas de potência baseadas em ajustamentos pelo dados brutos para ambos os períodos de estudo

No primeiro período de estudo, as curvas de potências revelam concordância com a curva de potência medida. A curva baseada no anemómetro da *nacelle* é subestimada devido à sobrestimativa da velocidade apresentando coeficientes de desempenho reduzidos.

A indagação deste períodos de estudo permitem concluir que as características de resposta do anemómetro implica o sucesso de toda esta metodologia e o seu implica necessariamente uma reflexão e verificação do anemómetro usado.

As curvas de potência resultantes da aplicação das funções de transferência do aerogerador 8, 12 e do período de Janeiro a Abril ao aerogerador 1 no período de Junho a Dezembro encontram-se representadas no gráfico 7.41.

Tal como esperado, as curvas de potência assumem um comportamento errático e sub/sobrestimam significativamente a curva de potência do fabricante assim como a medida.

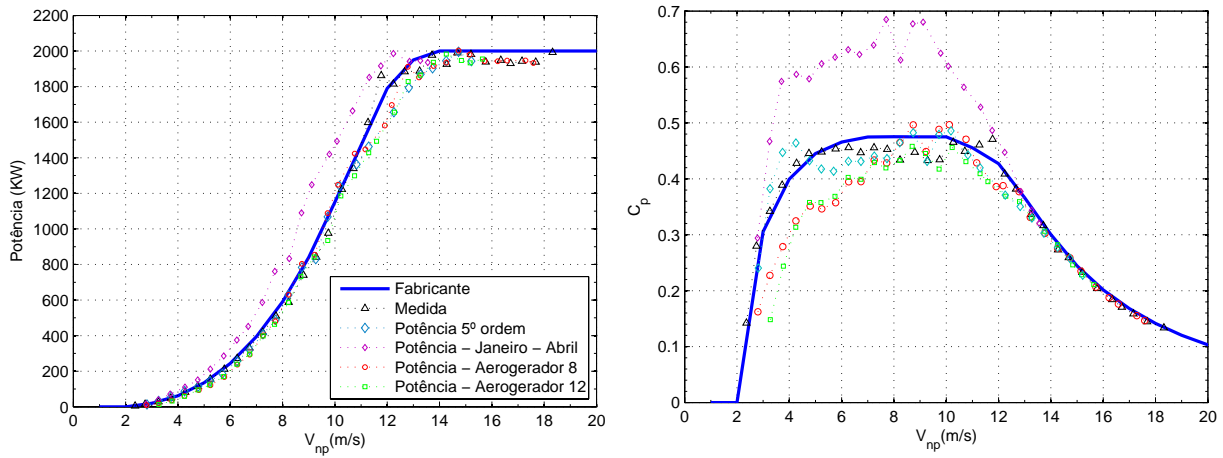


Figura 7.41: Curvas de potência para funções de transferência diferentes

### 7.2.5 Produção anual expectável

O histograma de vento do parque eólico do Outeiro em conjuntura com a curva de potência determinada para ambos os períodos permite obter a produção anual expectável e estimar a influência das calibrações dos anemómetros. A estimativa da diferença de produção anual expectável realizou-se de modo análogo a Candal/Coelheira.

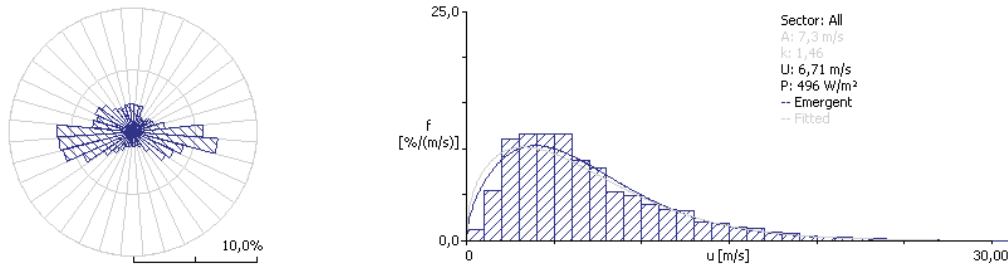


Figura 7.42: Histograma de ventos - 281

As curvas de potência baseadas no anemómetro da *nacelle* revelam-se penalizadoras para ambos os períodos. Contudo, para o período de Junho a Setembro o ajustamento pelos dados brutos revela uma subestimativa exagerada devido ao número limitado de ocorrências superiores a 12 m/s. Os restantes ajustamentos matemáticos levam a resultados muito semelhantes e não revelam excedentes elevados em função dos parâmetros de forma e de escala.

As análises dos aerogeradores precedentes em conjunto com este, permite concluir que a metodologia referida na norma IEC61400 parte 12-2 nem sempre leva a melhores resultados.

Tabela 7.4: Produção anual expectável - Aerogerador 1

Curva de Potência	Janeiro Abril			Junho Dezembro			$\Delta\delta h_{pc}$
	AEP(Gwh)	$\delta h_{pc}$	$\frac{AEP-AEP_{Fab}}{AEP_{Fab}} (\%)$	AEP(Gwh)	$\delta h_{pc}$	$\frac{AEP-AEP_{Fab}}{AEP_{Fab}} (\%)$	
Fabricante	4788.5	0	0	4788.5	0	0	-
Medida	4740.1	-24	-1.0	4678.6	-55	-2.3	-
<i>Nacelle</i>	4266.6	-261	-10.9	5190.1	201	8.4	-
4º Ordem	4668.8	-60	-2.5	4629.7	-79	-3.3	-
5º Ordem	4664.1	-62	-2.6	4596.1	-96	-4.0	0
Variância	4713.1	-38	-1.6	4624.3	-82	-3.4	-
Ocorrências	4669.8	-59	-2.5	4575.2	-107	-4.5	-
Ratios	4703.1	-43	-1.8	4628.5	-80	-3.3	-
Dados brutos	4702.7	-43	-1.8	4512.2	-138	-5.8	-
FT - Aerogerador 8	-	-	-	4573.2	-108	-4.5	-12
FT - Aerogerador 12	-	-	-	4437.1	-176	-7.3	-80
FT - Janeiro Abril	-	-	-	5563.1	387	16.2	-483

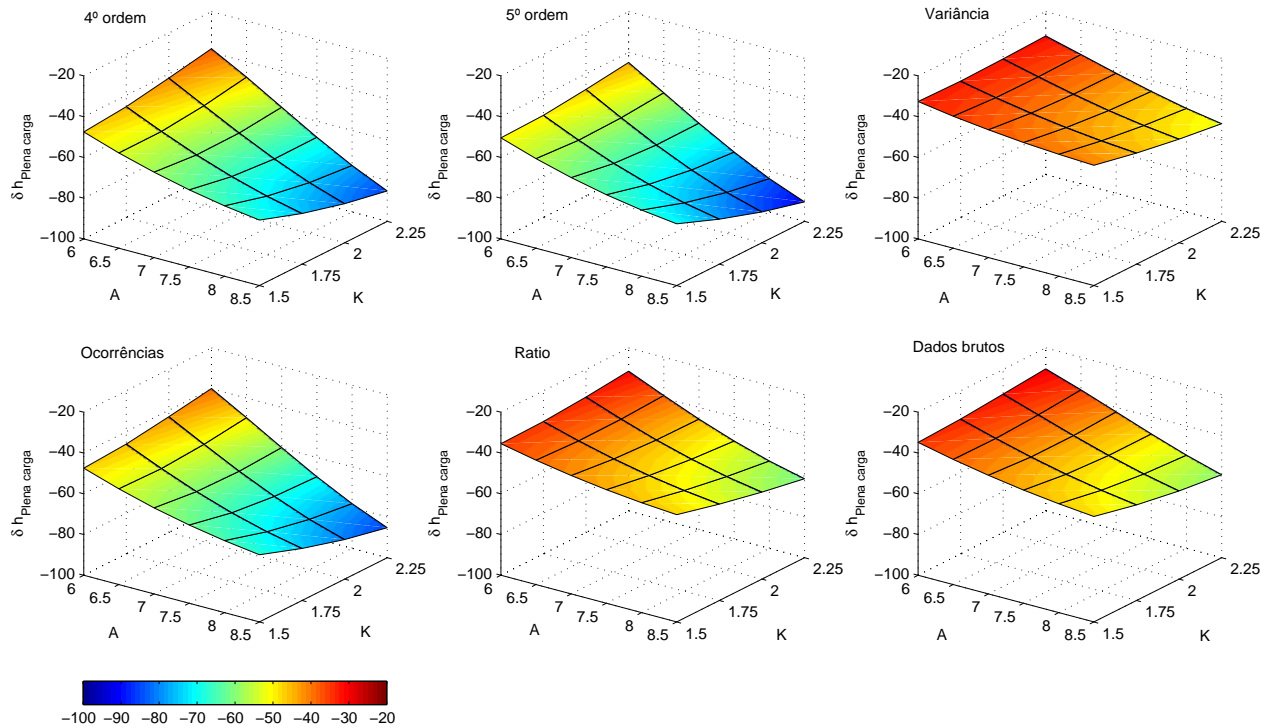


Figura 7.43: Sensibilidade ao factor de escala e de forma das curvas de potência - Janeiro Abril

## 7.2.6 Influência da orografia

No caso de estudo de Candal/Coelheira verificou-se que a relação entre velocidades pode diferir significativamente com a orografia. Este tema é o objectivo fulcral desta secção e

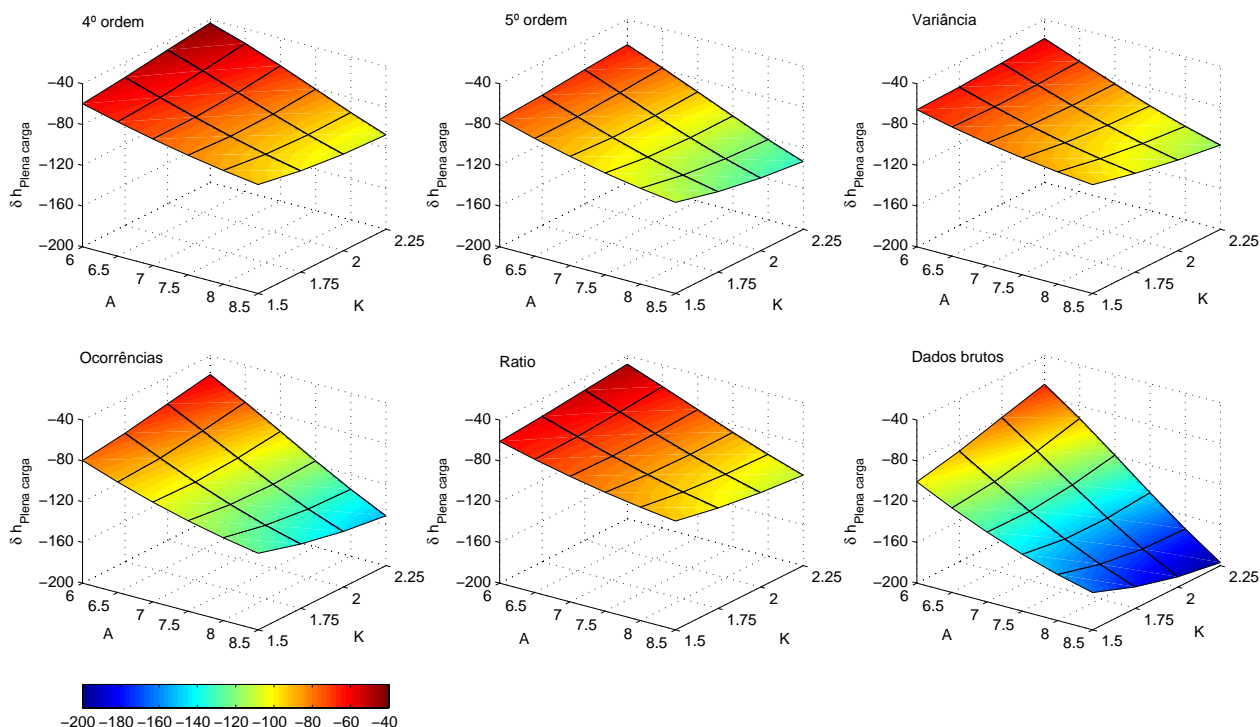


Figura 7.44: Sensibilidade ao factor de escala e de forma das curvas de potência - Junho Dezembro

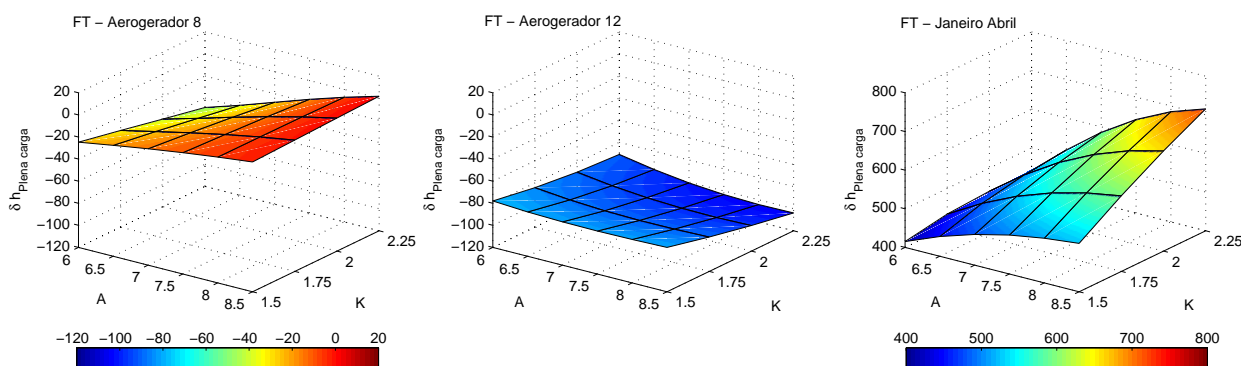


Figura 7.45: Sensibilidade aos parâmetros da distribuição de Weibull para funções transferências de Candal/Coelheira e do primeiro período de estudo

pretende-se avaliar de modo análogo ao caso de estudo de prévio a sua relação sectorialmente tendo como base dois anemómetros diferentes.

As figuras 7.46 e 7.47 demonstram a relação entre as velocidades não perturbadas e a velocidade registada pelo anemómetro na *nacelle* assim como o número de ocorrências respectivo a cada sector. Em ambos os períodos de estudo, o número de ocorrências é diminuto sendo apenas legítimo a sua análise nos sectores contidos 32 a 35.

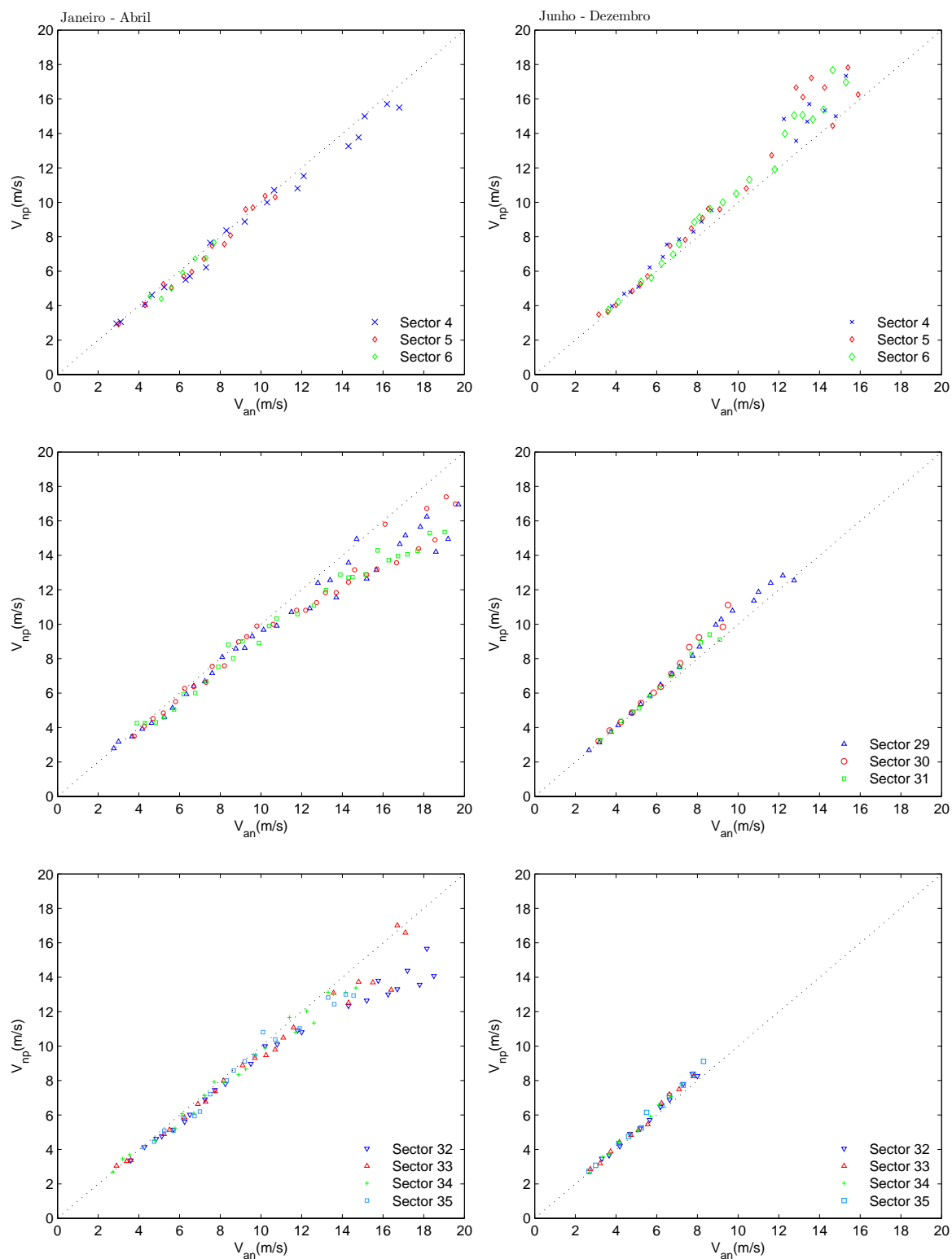


Figura 7.46: Relação das velocidades sectorialmente para ambos os períodos de estudo

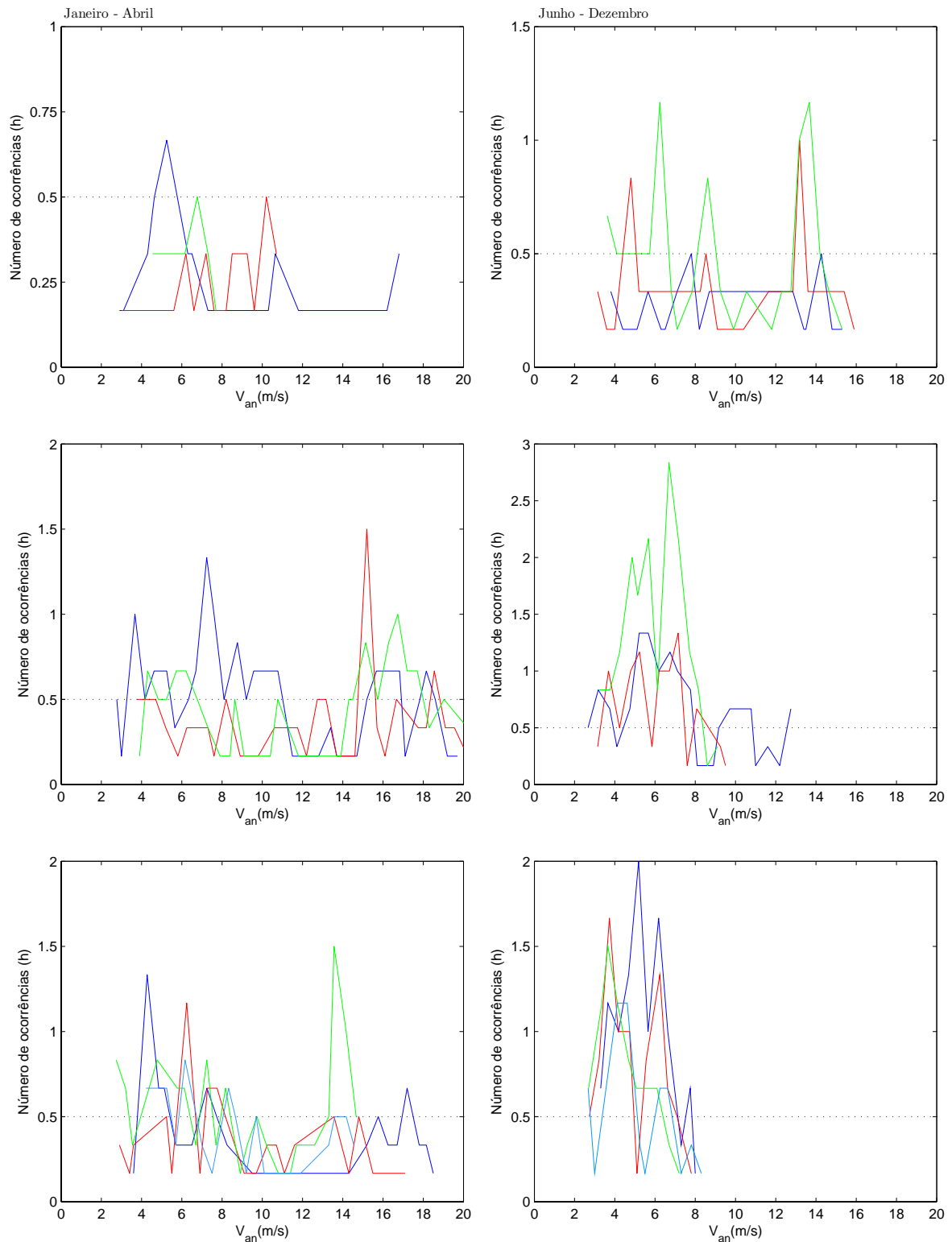


Figura 7.47: Número de ocorrências nos sectores para ambos os períodos de estudo

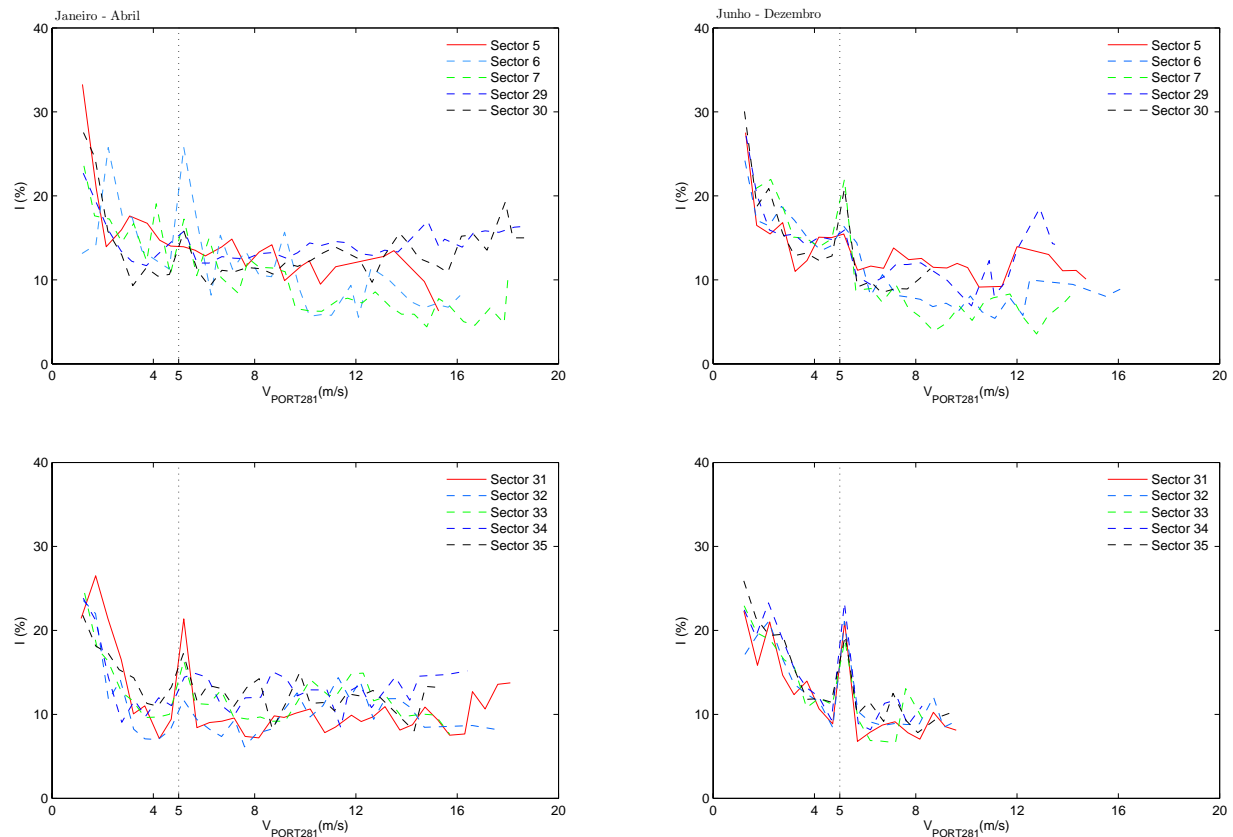


No primeiro período de estudo, o excesso de velocidades para sectores contíguos e a sua variação ao longo do domínio é muito idêntica sendo possível a sua visualização no gráfico 7.46. De igual modo, o défice entre sectores contíguos do período de estudo seguinte verifica a mesma evolução, demarcando que o comportamento da velocidade do anemómetro deve-se proeminentemente às características de resposta do anemómetro.

## 7.2.7 Influência da turbulência

Os índices de turbulência para cada sector encontram-se representados na figura 7.48. Estes distinguem-se do parque eólico de Candal/Coelheira devido à maior altitude e magnitude da velocidade do vento experimentada pela estação anemométrica de referência PORT281.

Em ambos os períodos de estudo os índices variam e não se verifica nenhuma dependência da turbulência na relação entre velocidades.



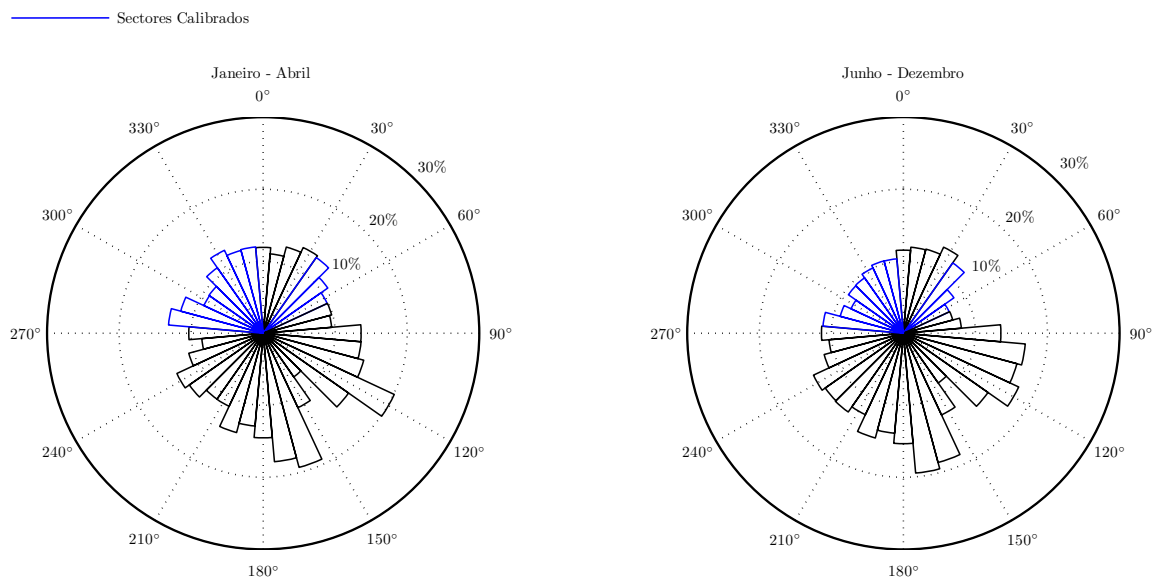


Figura 7.48: Intensidade de turbulência por sector

## 7.2.8 Rotor parado

O relação entre velocidades do período de estudo de Junho a Dezembro assim como a sua magnitude é idêntico ao verificado no caso de estudo prévio, subscrevendo a ideia que efectivamente na ausência de movimento do rotor ocorre um aceleração do escoamento entre as pás.

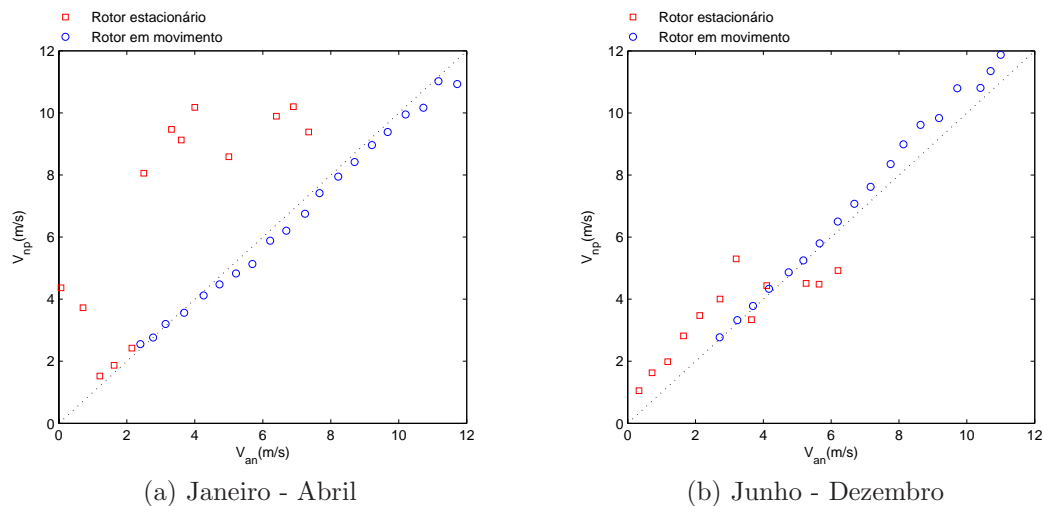


Figura 7.49: Intensidade de turbulência medida na estação anemométrica PORT281

No primeiro período verifica-se que na presença de uma obstrução do escoamento pela pá a velocidade medida pelo anemómetro é drasticamente inferior, devido à leitura deficiente de velocidades .

# Capítulo 8

## Conclusão

*Conclusões*

*Sugestões para trabalhos futuros*



## Conclusão

As curvas de potência dos aerogeradores representam um sumário de todas as suas características técnicas e a carência de metodologias menos dispendiosas que permitam a sua medição, incita uma reflexão sobre esta temática.

O trabalho desenvolvido no âmbito desta tese, consistiu na análise dos factores de distorção no escoamento induzidos pelo rotor na velocidade medida pelo anemómetro na *nacelle* e o seu uso como recurso coerente e versátil para medição das curvas de potência.

A investigação aqui apresentada baseia-se na análise de três aerogeradores de dois parques eólicos distintos. Os aerogeradores são Enercon E70-E40 e E66-20 e possuem 2.05 e 2 MW de potência nominal respectivamente.

O estudo inicia-se com a análise da relação entre a velocidade não perturbada no rotor e a velocidade registada no anemómetro na *nacelle*. Verificou-se a existência de um défice de velocidades que varia com o aumento da velocidade medida do anemómetro, concluindo-se que a relação entre as velocidades não é linear.

A determinação de diversos ajustamentos polinomiais entre a velocidade não perturbada no rotor e a velocidade registada no anemómetro na *nacelle* permitiu quantificar os efeitos de distorção induzidos pelo rotor. Definiram-se as curvas de potência via anemómetro na *nacelle* e os resultados revelam concordância com a curva de potência do fabricante. A diferença da produção anual expectável relativamente à do fabricante, apresenta um máximo e mínimo de -107 e 1 hora equivalente a plena carga dependendo do tipo de ajustamento matemático.

Posteriormente, estudou-se a relação entre as velocidades sectorialmente, verificando-se uma dependência da relação entre as velocidades em função do perfil de velocidades resultante das condições orográficas.

A transmissibilidade dos ajustamentos matemáticos foi igualmente analisada. Para tal, investigou-se:

- Para ocorrências de sectores com orografia distintas, qual a curva de potência resultante baseada num ajustamento matemático determinado por ocorrências de todos os sectores. O excedente de produção expectável obtido foi de 40 horas a plena carga
- A transmissibilidade dos ajustamentos matemáticos determinados em Candal/Coelheira e do período em que o anemómetro se encontrava sob condições de medição deficiente. Os resultados revelam uma diferença de produção expectável de -186 e 387 horas equivalentes a plena carga

A influência do ângulo de ataque das pás e do desalinhamento entre o plano do rotor e o escoamento foi analisada. A mudança do ângulo de ataque das pás provoca um aceleração abrupto do escoamento na zona de esteira. Contudo, só se verifica para sectores com o perfil de velocidades mais uniforme. Em presença de alinhamento entre o rotor e o escoamento pode ocorrer situações de aceleração do escoamento. Porém, o comportamento do escoamento na esteira difere significativamente por sector.

A velocidade medida pelo anemómetro depende dos índices de turbulência a montante do rotor, [A. Albers et al., 2006]. Para sectores calibrados os índices de turbulência são pequenos e não se verificou a sua influência na relação entre velocidades. Conclui-se assim, que os efeitos de distorção são maioritariamente provocados pelo rotor.

Em virtude da geometria das pás, quando o rotor se encontra parado verifica-se uma aceleração do escoamento entre as pás do aerogerador.

Por último, conclui-se que a metodologia da norma IEC61400 Parte 12-2 é adequada e deve-se seguir as seguintes premissas:

- A curva de potência deve se basear em ajustamentos matemáticos sectoriais
- A sua transmissibilidade deve ser avaliada previamente assim como as condições de instrumentação para medição
- O alinhamento entre o escoamento e o plano do rotor deverá ser avaliado de forma a excluir sectores em que a relação entre velocidades varie significativamente

Contudo, as condições de transmissibilidade da função transferência não dependem só dos parâmetros de controlo do aerogerador e é necessária uma revisão das condições de transmissibilidade da função transferência impostas pela norma IEC61400 Parte 12-2.

## Sugestões para trabalhos futuros

Fica por abordar uma análise quantitativa da influência do perfil de velocidades e do ângulo de ataque das pás na relação entre a velocidade não perturbada e a velocidade registada no anemómetro da *nacelle*. De igual modo, é necessário uma indagação profunda que permita concluir qual o efeito dos níveis de turbulência nas estações de referência na velocidade medida pelo anemómetro.

Por último, fica por estudar a influência da geometria das pás e da *nacelle* na velocidade medida pelo anemómetro, não permitindo concluir sobre a transmissibilidade da função transferência determinadas para outros aerogeradores geometricamente diferentes.

## Apêndice A

### Curvas de potência mensais





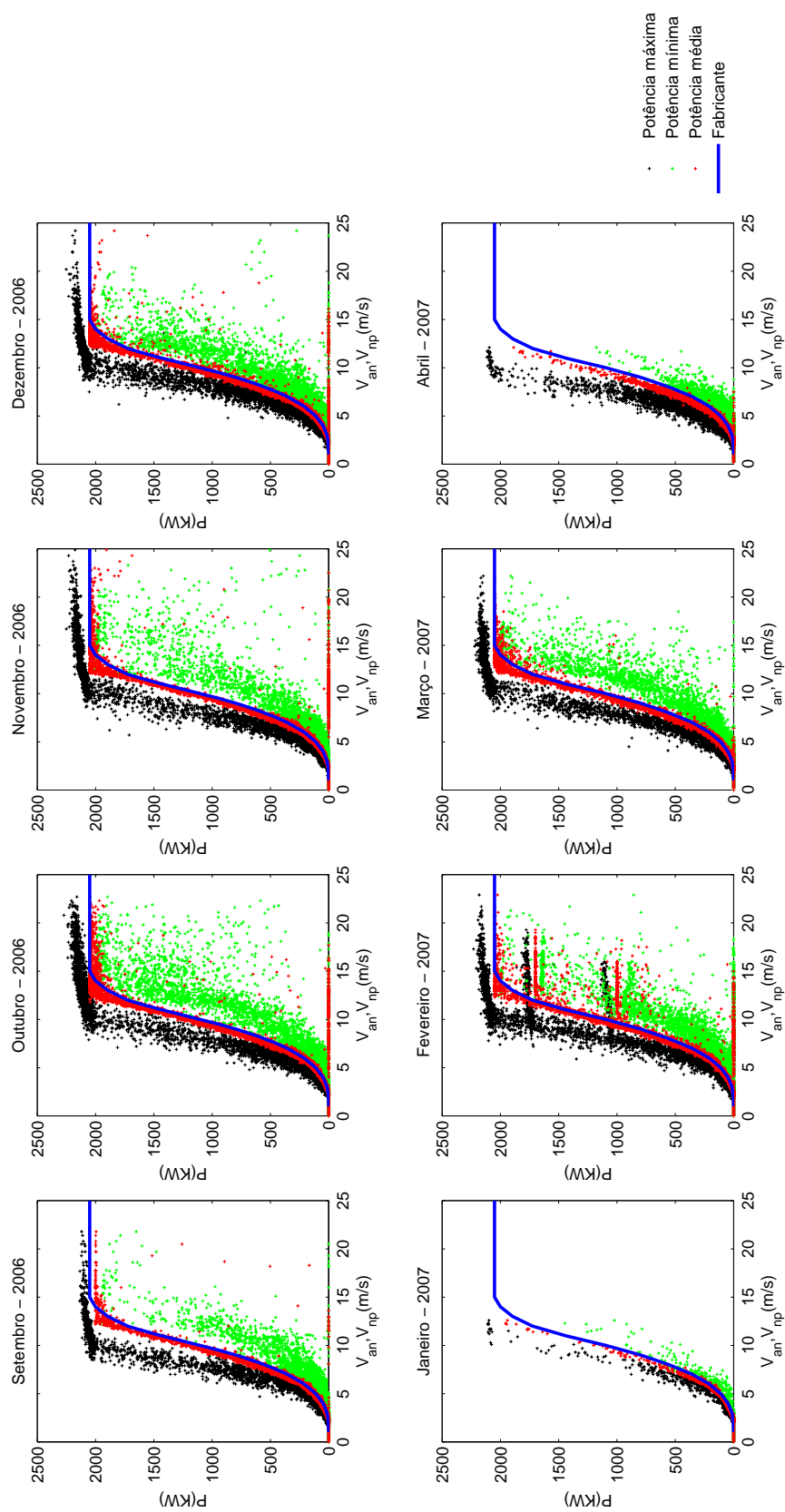
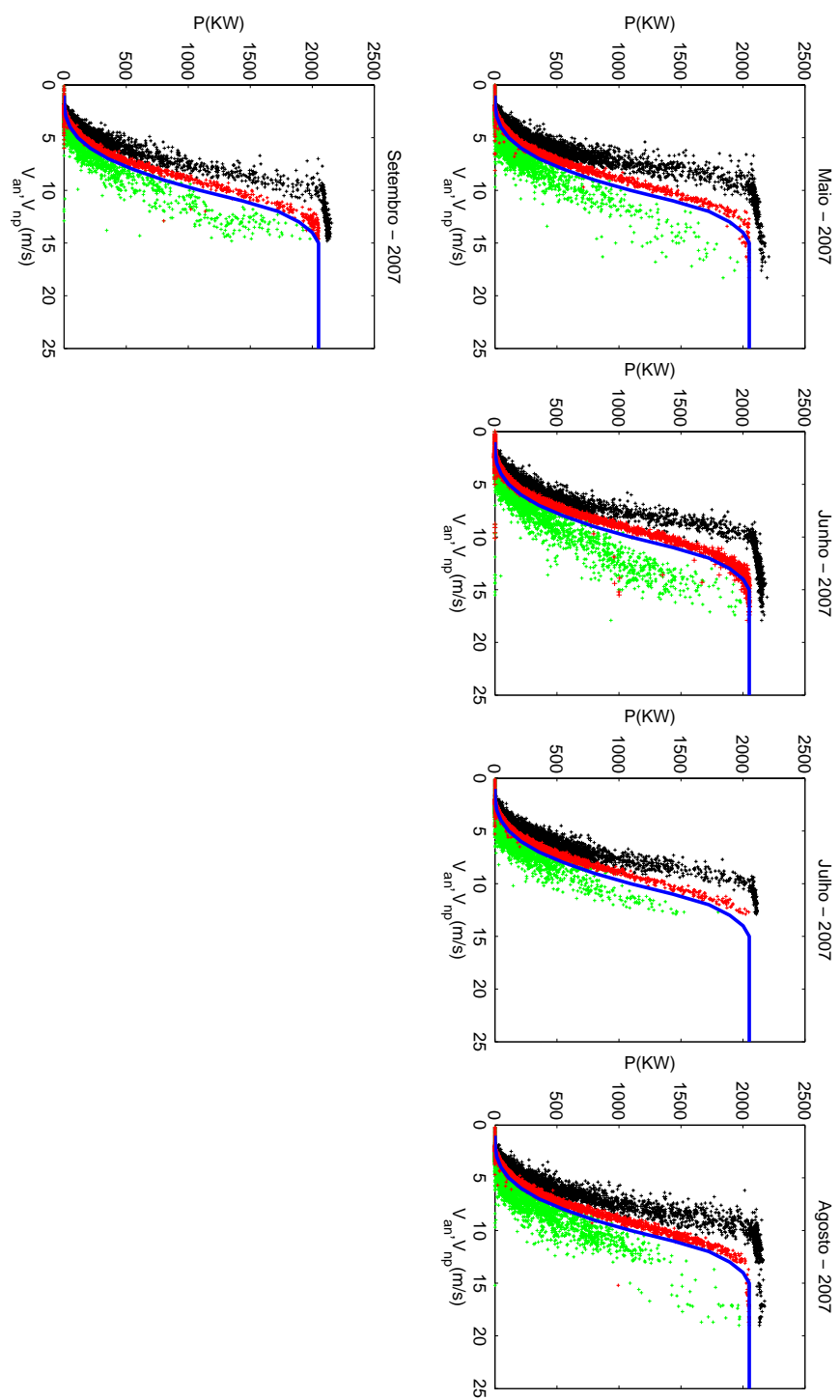


Figura A.1: Curvas de potência mensais do aerogerador 8



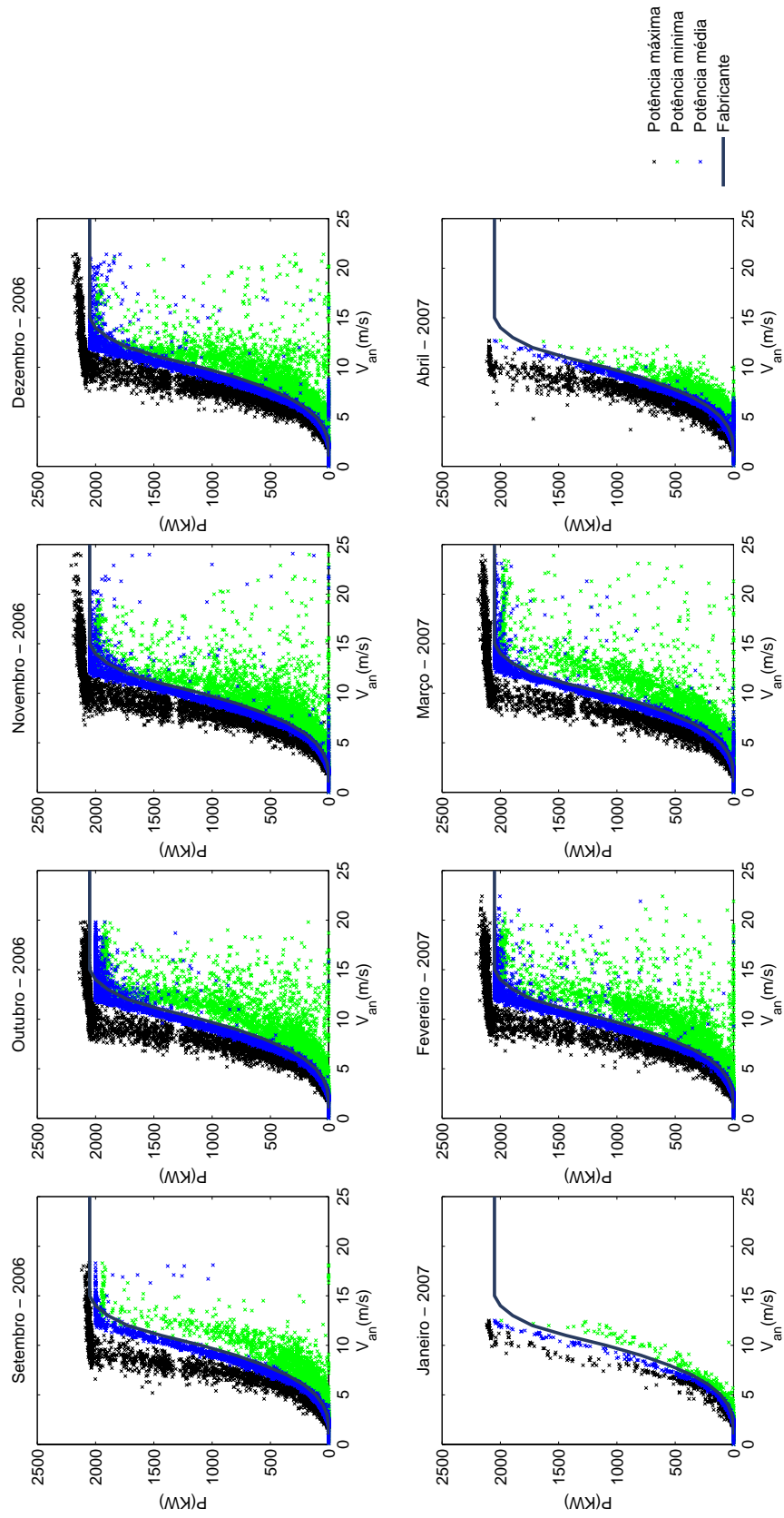
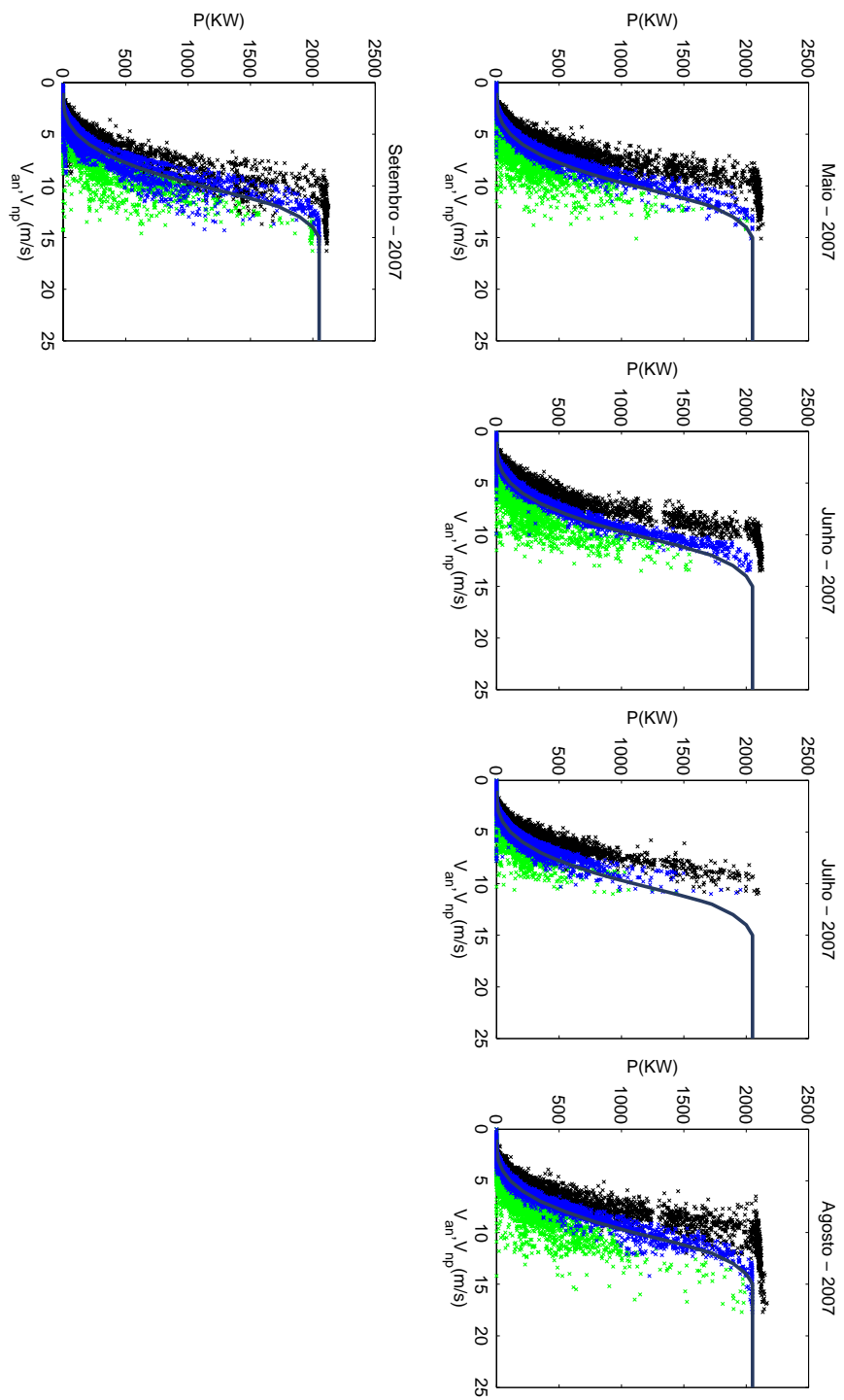


Figura A.2: Curvas de potência mensais do aerogerador 12



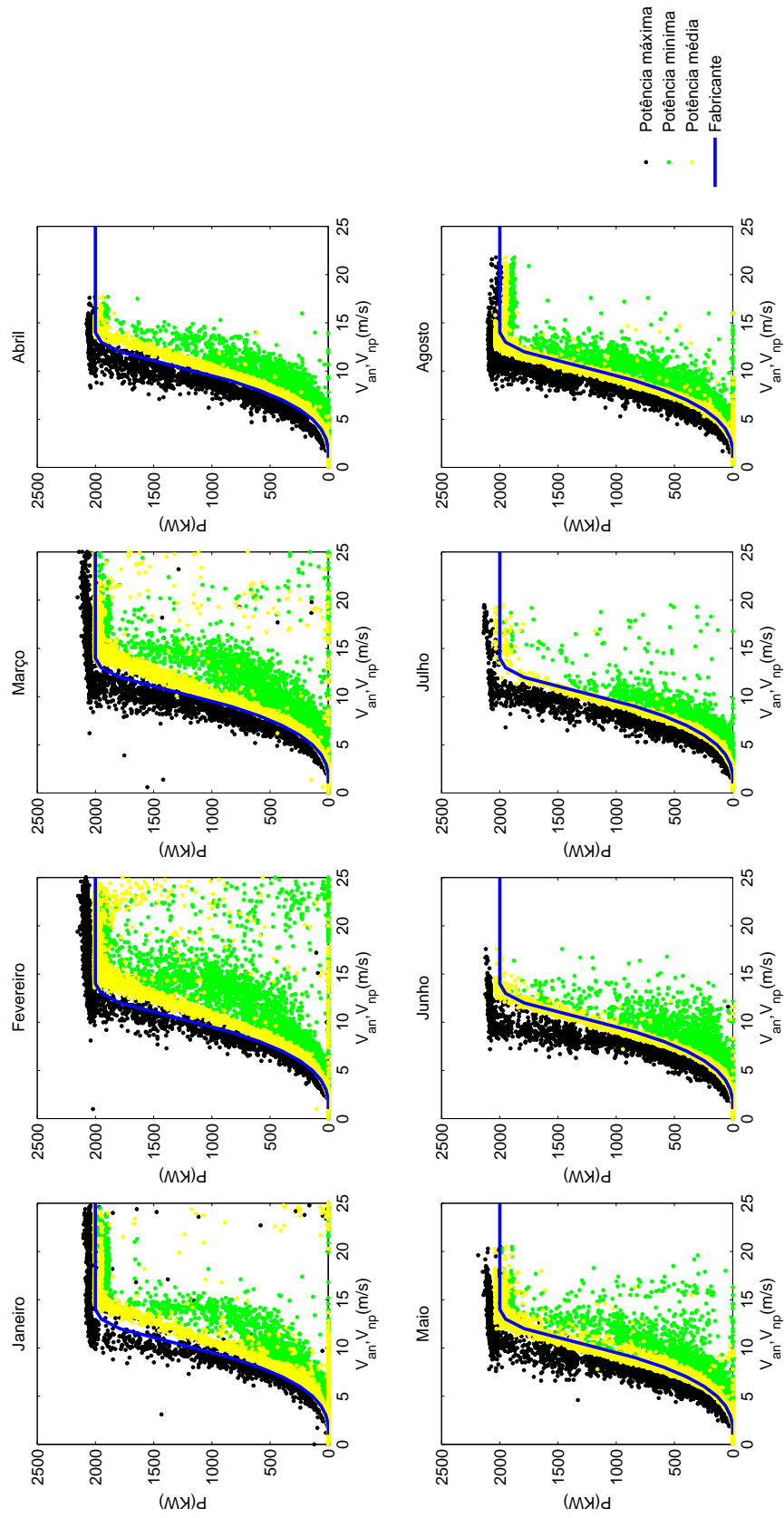
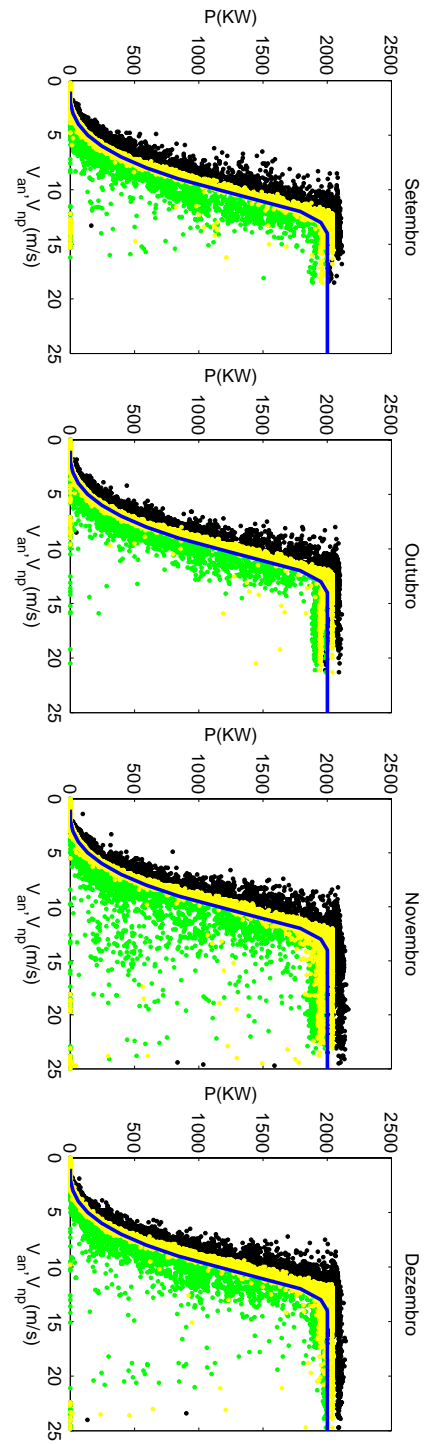


Figura A.3: Curvas de potência mensais do aerogerador 1



## Apêndice B

### Ajustamentos polinomiais





# Aerogerador 8

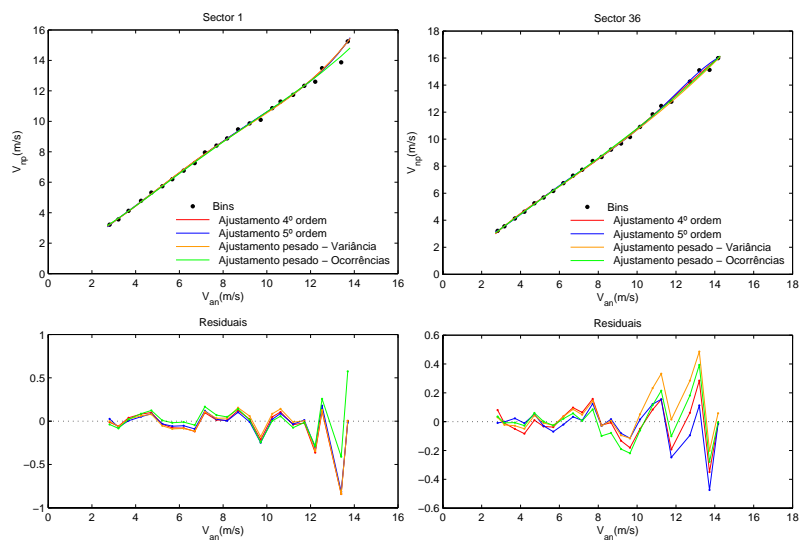
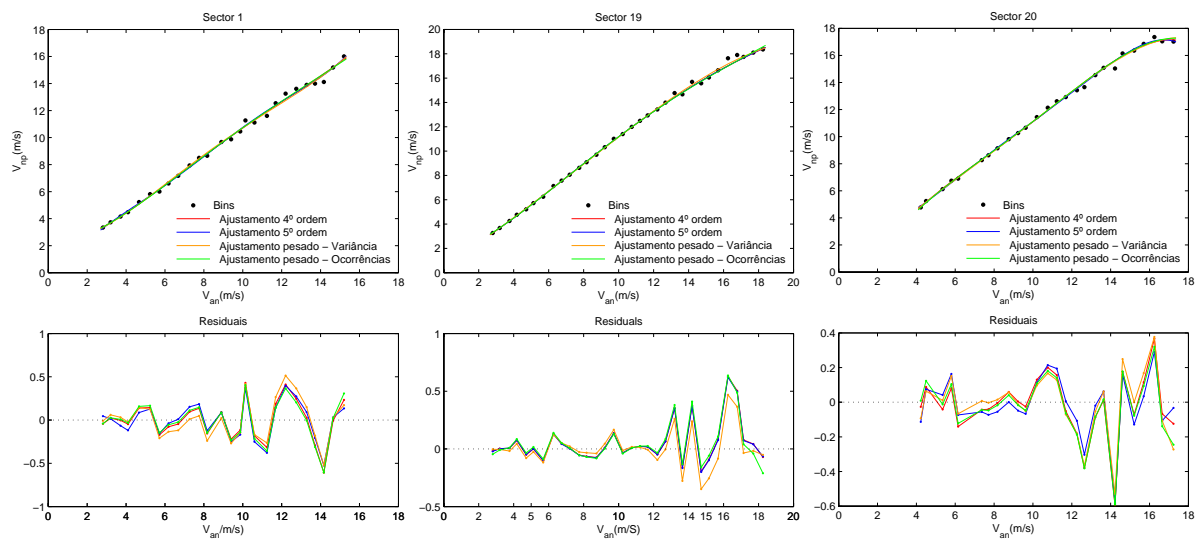


Figura B.1: Ajustamento polinomiais para os sectores calibrados do aerogerador 8

# Aerogerador 12



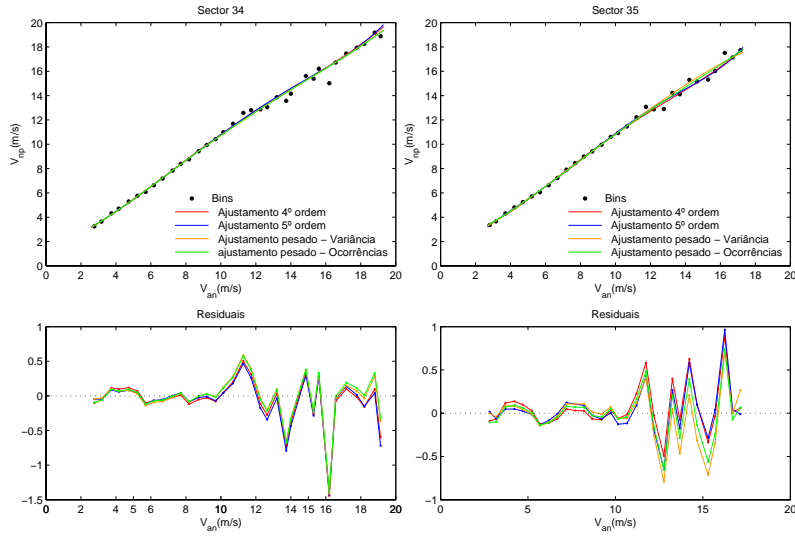


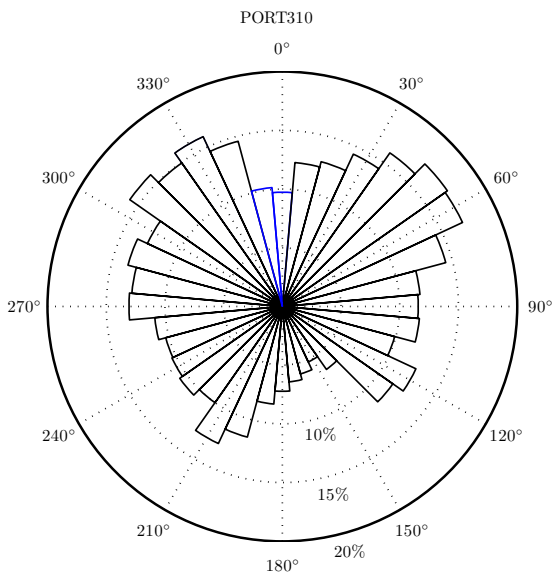
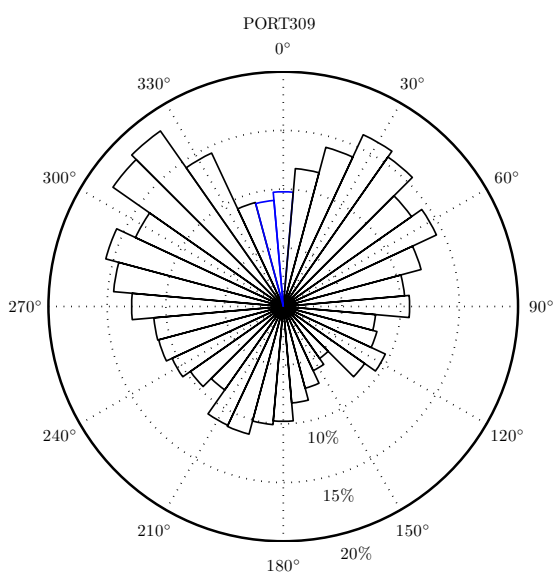
Figura B.2: Ajustamento polinomiais para os sectores calibrados do aerogerador 12

## Apêndice C

### Índices de turbulência



— Sectores Calibrados



— Sectores Calibrados

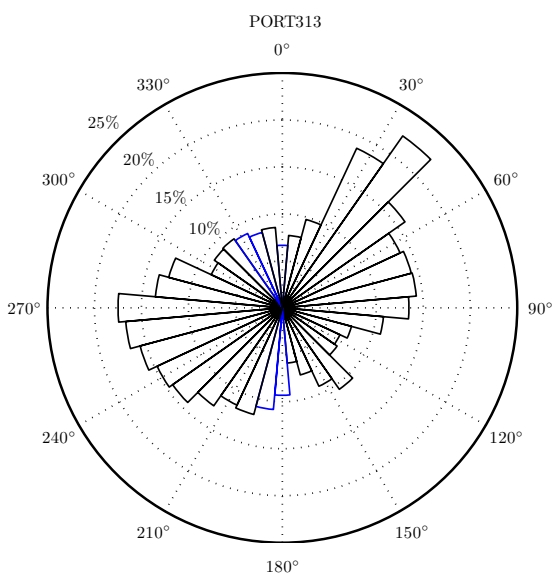
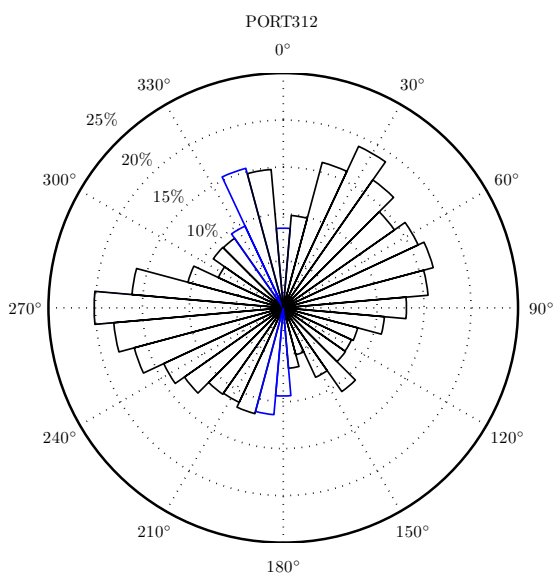


Figura C.1: Índices de turbulência para as estações anemométricas



## Apêndice D

### Calibração da direcção do escoamento





# Aerogerador 8

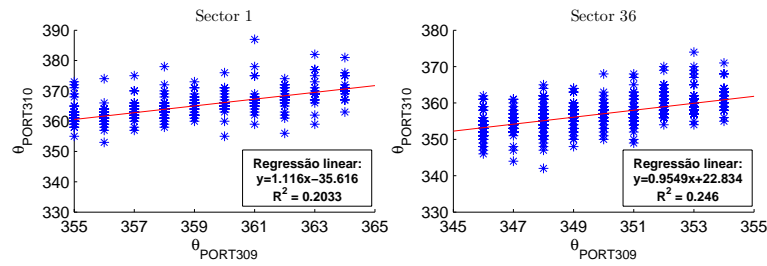


Figura D.1: Regressões lineares para 2-8 m/s

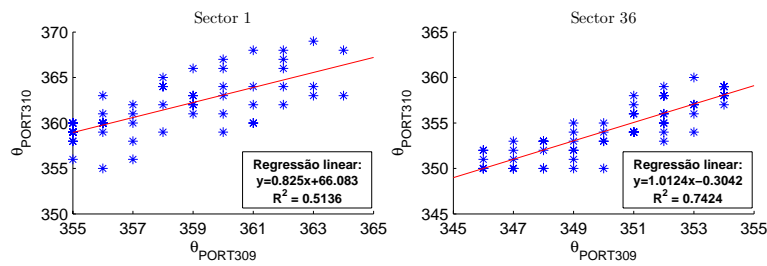


Figura D.2: Regressões lineares para 8-16 m/s

# Aerogerador 12

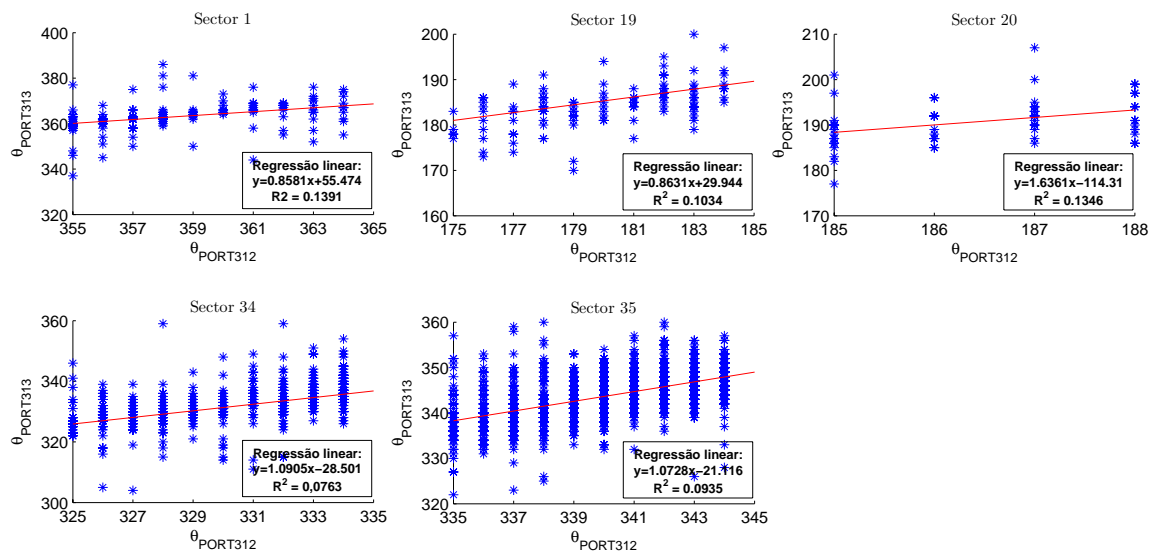


Figura D.3: Regressões lineares para 2-8 m/s

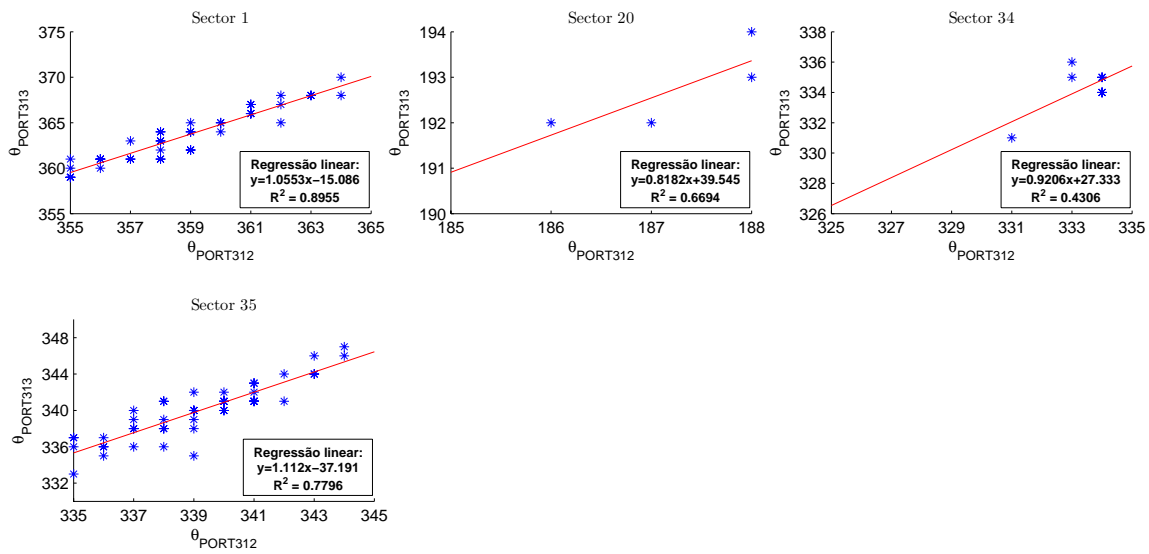


Figura D.4: Regressões lineares para 8-16 m/s